

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Matemaatika ja statistika instituut

Kerli Mägi

LAOLIIKUMISTE ANALÜÜS JA OPTIMEERIMINE TOOTMISSETEVÕTTES

Kindlustus- ja finantsmatemaatika eriala

Magistritöö (30 EAP)

Juhendaja Meelis Käärik

PhD

Tartu 2019

Laoliikumiste analüüs ja optimeerimine tootmisettevõttes

Magistritöö

Kerli Mägi

Magistritöös analüüsitakse konkreetse tootmisettevõtte laos toimuvate liikumiste kestuseid üldistatud lineaarsete mudelite abil. Igale laosisesele asukohale antakse hinnang, kui palju kulub aega sellest väljastusalani jõudmiseks. Teiselt poolt analüüsitakse vaatlusperioodi jooksul käsitletud kaupade komplekteerimissagedusi. Kõige sagedamini komplekteeritavate kaupadega seotud liikumiste kirjeldamiseks viiakse läbi täiendav analüüs. Laoasukohad ja kaubad jaotatakse klassidesse ning viiakse vastavusse. Lõpptulemusena valmib rakendus, mille abil on võimalik leida igale kaubale parim ladustamispiirkond.

CERCS teaduseriala: P160 Statistika, operatsioonianalüüs, programmeerimine, finants- ja kindlustusmatemaatika

Märksõnad: Üldistatud lineaarsed mudelid, tõenäosusjaotused, andmeteadus, visualiseerimine

Warehouse slot location analysis and optimization in a manufacturing company

Master's thesis

Kerli Mägi

The objective of this master's thesis is to analyse the durations of movements inside a warehouse of a specific manufacturing company using generalized linear models. An assessment is made of each slot, of how much time does it take to reach from the specific slot to the outbound area. On the other hand, the picking frequency of the products is analysed. An additional analysis of the most frequently picked products is carried out. The slots are classified into zones that correspond to the classes of products. As a result an application is created that allows the user to find the best storage area for each product.

CERCS research specialisation: P160 Statistics, operations research, programming, actuarial mathematics

Keywords: Generalized linear models, probability distributions, data science, visualization

Sisukord

Sisukord.....	3
1 Sissejuhatus	5
2 Laoplaneerimine tootmisettevõttes	7
2.1 Laoplaneerimise olulisus	7
2.2 Laopaigutuse analüüsivõimalused	7
3 Vaadeldava tootmisettevõtte laopaigutus	9
3.1 Vaadeldava näite andmeanalüüsi teostamise töökaava	10
3.2 Vaadeldava näite laopaigutuse andmed	10
3.2.1 Andmete päritolu	11
3.2.2 Andmete olemus	11
3.2.3 Andmete puhastamine	14
4 Konkreetse näite laopaigutuse analüüs ja mudeldamine	18
4.1 Üldistatud lineaarsete mudelite üldkuju	18
4.2 Töös kasutatavad jaotused	19
4.2.1 Normaaljaotus.....	20
4.2.2 Lognormaaljaotus	20
4.2.3 Gammajaotus	20
4.2.4 Gaussi pöördjaotus	20
4.2.5 Poissoni jaotus	21
4.3 Mudelite sobivuse hindamine	21
4.4 Laoliikumiste kestuse mudel	24
4.4.1 Lisatud tunnused.....	26
4.4.2 Plokk A.....	26
4.4.3 Plokk B	31
4.4.4 Plokk C	35
5 Kaupade analüüs ja mudeldamine	40
5.1.1 Üldpilt.....	40
5.1.2 Prioriteetsete kaupade detailne analüüs	41

5.1.3 Prioriteetsete kaupade detailanalüüsi järeldused	47
6 Laopagutuse ja kaupade asukohtade kooskõlastamine.....	49
6.1.1 Asukohtade ja kaupade jagamine ABC klassidesse	49
6.1.2 Loodud rakenduse tutvustus ja tulemuste kirjeldus.....	50
7 Kokkuvõte	53
Kasutatud kirjandus	54
Lisa 1 – Laoplaani selgitus	55
Lisa 2 – Laoplaan täiendavate tunnustega	58
Lisa 3 – Vahekäigu tunnus	60
Lisa 4 – Täiendavad joonised ja tabelid	61

1 Sissejuhatus

Laod osutavad tänases majanduskeskkonnas väga kõrge väärtusega teenuseid. Laopidamine nõuab tööjõudu, kapitali (maad, ladustamis- ja haldusvahendeid) ning üldjuhul ka vastavat infosüsteemi. Nimetatud ressursside omamine ja haldamine hõlmab märkimisväärselt väljaminekut, mida on raske vältida. ([1], lk 5)

Küll aga leidub võimalusi kulude optimeerimiseks. Logistikas moodustavad suure osa kuludest just laos toimuvad protsessid. Üks võimalus paljudest on laoliikumiste optimaalsena hoidmine ning lao läbilaskevõime maksimeerimine olemasolevate ressurssidega.

Käesoleva töö sisendiks on reaalselt eksisteeriva tootmisettevõtte lao paigutuse optimaalsusega seotud küsimused. Soovitakse jõuda arusaamani, kas kaubad on laos paigutatud parimal viisil. Töö eesmärk on luua lõppkasutajatele rakendus, mille abil saadakse esiteks reaajas ülevaade, kuidas on kaubad hetkel paigutatud ning teiseks, milline oleks parim võimalik piirkond iga kauba ladustamiseks. Rakenduse loomise alameesmärgid on praeguse laopaigutuse visualiseerimine, asukohtade ligipääsetavuse (möödetuna ajas) hindamine statistiliste mudelite abil, kaupade analüüs ja ladustamiseks parimate asukohtade leidmine. Tulemuseni jõudmiseks kombineeritakse analüüsi tulemusi ja parimaid praktikaid logistikavaldkonnast.

Töö on jaotatud teemade kaupa seitsmesse peatükki. Esmalt tutvustatakse üldiseid väljakutseid, mis laopidamisega seonduvad ning probleeme, mida minnakse lahendama konkreetses näitelaos. Järgnevalt selgitatakse erinevaid teooriaid, millest võib kaupade ladustamise strateegia kujundamisel lähtuda. Seejärel kirjeldatakse andmeid - päritolu, nende olemust ning analüüsile eelnenud ettevalmistusfaasi. Samuti antakse põgus ülevaade vahenditest (keskkonnad, programmeerimiskeeled), mille abil analüüs teostati.

Järgneb peatükk lao asukohtadevaheliste liikumiste kestuste mudeldamisega vaadeldavas näitelaos. Tuuakse välja kandidaatmudelid igale olukorrale ja põhjused, miks ühe või

teise mudeli kasuks otsustati. Analüüsi tulemusena leitakse, kui kaua aega kulub igast laosukohast väljastusalani jõudmiseks.

Sellele järgnevalt analüüsitakse kaupsid, mida vaatlusperioodi jooksul on näitelaos käsitletud. Püütakse jõuda arusaamani, millised on enim tähelepanu nõudvad kaubad, ning jagada kaubad klassidesse vastavalt sellele, kui sageli on neid komplekteeritud. Kõige prioriteetsemate kaupade liikumiste paremini mõistmiseks viiakse läbi täiendavad kaubapõhised detailanalüüsid. Töö viimases sisupeatükis kirjeldatakse valminud rakendust.

2 Laoplaneerimine tootmisettevõttes

Tootmisettevõtte laopidamine erineb mõneti hulgilao või müügiettevõtte lao spetsiifikast. Tootmisettevõttes saabub kaup lattu, kui on tekkinud otsene nõudlus. Sellest tulenevalt võib öelda, et tootmisettevõtte laos on kaupade nõudlus täpsemini teada kui tavalises hulgilao. Seda teadmist saab laopaigutuse planeerimisel arvesse võtta.

2.1 Laoplaneerimise olulisus

Laopidamise efektiivsus mängib olulist rolli klienditeeninduse kõrge taseme tagamisel, aga ka kulude kokkuhoiu võimaldamisel. Selgub, et Euroopa ettevõtetes umbes 39% logistika kuludest moodustavad laotegevused. Kuna laos toimuval on tarneahelale tervikuna väga suur mõju, siis ladude kuluefektiivne majandamine on üheks kriitilise tähtsusega teguriks ettevõtte edu saavutamisel. ([2], lk 1)

Laotegevustest on komplekteerimine kõige tööjõumahukam ja aeganõudvam tegevus enamikes ladudes. Komplekteerimise resultatiivsuse tõstmine üldjuhul tähendab suurte investeeringute tegemist. Kui logistika kuludest 39% hõlmavad laotegevused, siis nendest omakorda 55% moodustavad komplekteerimisega seotud kulud. Ladustamise ja komplekteerimistegevuste sihipärane juhtimine võib osutada otseseks tootmisettevõtte edukuse mõjutajaks. ([2], lk 1)

2.2 Laopaigutuse analüüsivõimalused

Kaupade ladustamisel on praktikas on kasutuses mitmeid erinevaid strateegiaid. Erinevaid ladustamispoliitikaid tutvustatakse lähemalt Nima Zaerpouri doktoritöös „Efficient Management of Compact Storage Systems“, mis on ka käesoleva peatüki sisu aluseks ([3], lk 11-12).

Üks võimalusi on paigutada kaubad lattu juhuslikult. Sellist ladustamisstiili kasutatakse juhul, kui kaupade varasema nõudluse informatsioon on vähene või puudulik. Samuti rakendatakse praktikas klassipõhist ladustamist, aga ka ladustamispoliitikat, mille puhul igale kaubale on määratud kindel asukoht. Kahe viimase strateegia kasutuselevõtmise eelduseks on iga kauba varasema noppimissageduse ja -asukoha ajalooliste andmete olemasolu.

Paigutades populaarsemad kaubad väljastusalale lähemale, on võimalik vähendada laos kaupade liigutamisele kuluvat aega. Konkreetse kauba parim võimalik asukoht laos sõltub nimetatud kauba nõudluse sagedusest. Ladustamispoliitika, mille puhul leitakse igale kaubale fikseeritud asukoht, järjestatakse kaubad esmalt nõudluse sageduse alusel kahanevalt ning seejärel määratakse nende optimaalne asukoht laos. Viimase aluseks on väljastusala kaugus konkreetsest asukohast kahanevas järjestuses.

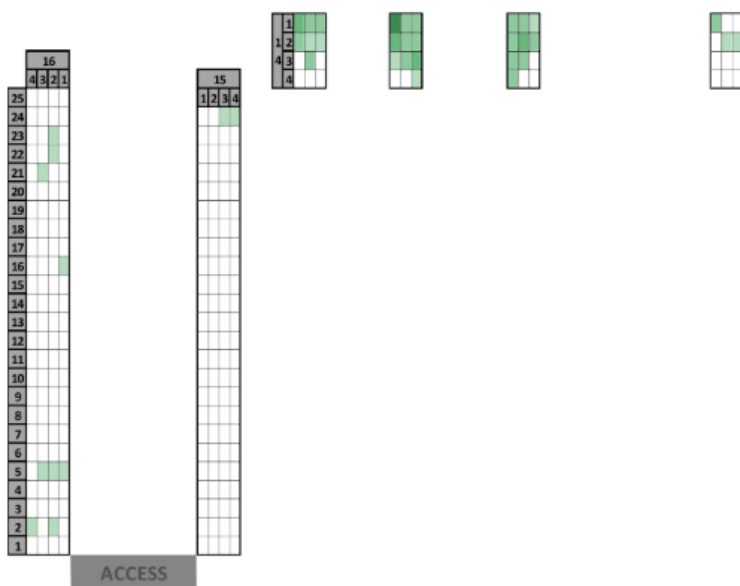
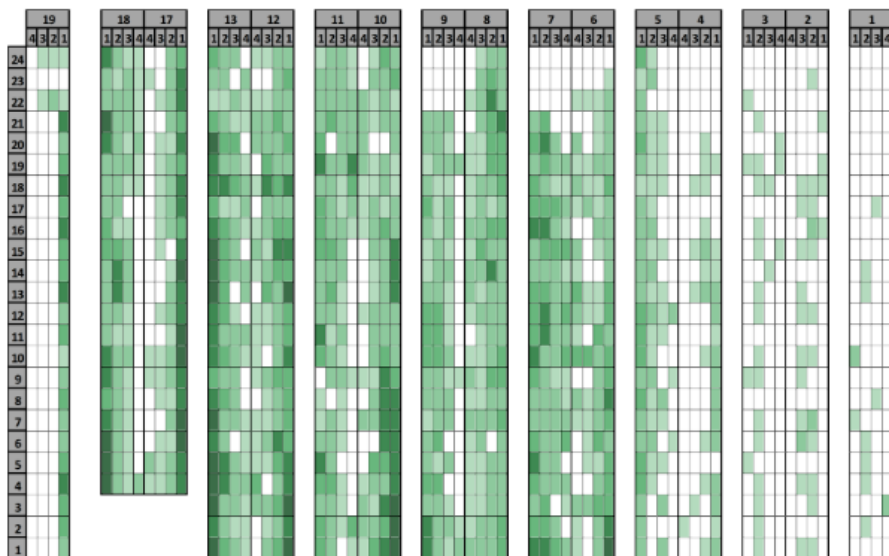
Muutus kauba väljastuse sageduses või kaubasortimendi täienemine fikseeritud asukoha kasutamisel võib viia olukorrani, kus kaubad tuleb täielikult või osaliselt ümber paigutada. Alternatiivse võimalusena kasutatakse klassipõhist ladustamise stiili. Sellisel juhul jaotatakse lao asukohad ja kaubad n klassi, $n > 2$. Asukohtade klassidesse jaotamisel võetakse aluseks asukoha kaugus väljastusalast ning kaupade puhul nõudluse sagedus.

Kõige suurema nõudluse sagedusega kaubad määratakse asukoha klassidesse, mis asuvad väljastusalale kõige lähemal. Iga asukoha klassi sees on kaubad paigutatud juhuslikult. Klassipõhine laopaigutus on lihtsasti praktikasse ülekantav ning tulemuslikkus võrreldav laopoliitikaga, mille puhul on igale kaubale määratud fikseeritud asukoht.

Klassipõhise ladustamise puhul on oluline otsustada klasside arv ja sellest tulenevalt iga kaubaklassi või asukohtade tsooni suurus. Praktikas on levinud kahe- ja kolmeklassilised laopaigutused ning seda eelkõige väikese keerukusastme tõttu. Sageli on siiski võimalik laos kaupade liigutamiseks kuluvat aega veelgi vähendada täiendavate tsoonide lisamisega.

3 Vaadeldava tootmisettevõtte laopaigutus

Käesolevas töös käsitletakse näitelahendusena reaalselt eksisteeriva tootmisettevõtte ladu. Laopaigutuse analüüsi aluseks on allpool olev laoplaan pealtvaates (vt Joonis 1). Laoplaani täpsem selgitus on leitav lisast (vt Lisa 1).



Joonis 1. Laoplaan.

Joonisel on tumerohelisega märgitud asukohad, kust on tihti kaupa noppimas käidud. Asukohad, kust on harvem kaupa võetud, on märgitud vastavalt heledama tooniga ning

valgega märgitud asukohad on vaatlusperioodi (kaheksa kuu) vältel püsinud puutumatutena. Nagu jooniselt näha, esineb kohti, mis esmapilgul hinnates näivad asuvat väljastusalast kaugel, kuid kaupa käiakse neist noppimas võrdlemisi tihti.

3.1 Vaadeldava näite andmeanalüüsi teostamise töökaava

Selleks, et tekitada selge arusaam, millised asukohad on kauba väljastuseks parimad ning millisteni jõudmiseks kulub rohkem aega, tuleb anda täpne hinnang igale asukohale - kui palju kulub aega sellest väljastusalani jõudmiseks. Teise sammuna tuleb vastavalt hinnata, millisesse asukohta iga kaup paigutada.

Asukohtade kauguse hindamiseks on käesolevas töös kasutada laosiseste liikumiste ajalised kestused juhuslikust punktist A juhuslikku punkti B (asukohad, milles ühe komplekteerimistöö teostamiseks kaupasid noppimas käiakse). Seega et asukohtade kaugused kaardistada, tuleb esmalt mudeldada, kui kaua kulub aega erinevatest laopiirkondadest väljastusalale jõudmiseks. Teine samm on kaupade järjestamine ja klassifitseerimine väljastustiheduse alusel. Kolmas ülesanne on ühildada lao analüüsi ning kaupade analüüsi tulemused – määrata igale kaubale parim piirkond tulenevalt kauba ja laoasukoha iseloomust.

Pärast seda, kui on välja töötatud loogika, mille alusel määratakse igale kaubale tema õige asukoht, saab nimetatud tulemit kasutada kauba lattu sisenemisel. See tähendab, et laohaldamise tarkvarasse tuleb vastav loogika lisaks programmeerida. Selle tulemina antakse laotöötajale soovitus, kuhu konkreetne kaup laos paigutada. Soovituse andmine on pidev protsess. Kui pika perioodi vältel anda kauba paigutussoovitusi ja neid järgitakse, on olemas eeldus, et tekib olukord, kus kaubad paiknevad optimaalsetes asukohtades.

3.2 Vaadeldava näite laopaigutuse andmed

Käesolevas näites kasutatakse analüüsiks võrdlemisi suurt hulka andmeid. Puhastamata kujul on andmeid 55 913 rida. Andmed on kogutud vastava infosüsteemi abil ning analüüsi teostamiseks salvestatud eraldiseisvasse andmeaita.

3.2.1 Andmete päritolu

Selleks, et ettevõttel oleks selge arusaam, mis laos toimub ning kuidas sellega seotud ressursse mõistlikult kasutada, on oluline vastava infosüsteemi olemasolu. Vaadeldavas näites käsitletakse andmeid, mis pärinevad majandusinfosüsteemist Microsoft Dynamics AX. Nimetatud infosüsteemi abil kogutakse suures koguses andmeid ettevõttes toimuvatest protsessidest - alustades finantsist, lõpetades andmetega tootmisest, koondplaneerimisest, inimressurssidest, strateegilisest planeerimisest [4].

Laohaldusmoodul on osa keerukast infosüsteemist, mis abistab laovarude, -asukohtade ja tööjõu haldamisel. Suurettevõtetele on sellise süsteemi omamine kriitilise tähtsusega tagamaks klientide tellimuste kvaliteetset täitmist. ([1], lk 33)

Kogutud andmed on sisendiks analüüsi teostamisele andmeid kogunud infosüsteemist sõltumatute tööriistadega. Käesolevas töös kasutatakse andmeanalüüsi teostamisel kahte erinevat tarkvara ja programmeerimiskeelt. Statistilise analüüsi osa on teostatud kasutades programmeerimiskeelt R, mis hõlmab suurt amplituud statistilisi (lineaarset- ja mittelineaarset mudeldamist, klassikalisi statistilisi teste, aegridade analüüsi, klassifitseerimist, klasterdamist) ja graafilisi analüüsivõimalusi [5]. Kirjeldav analüüs viidi läbi programmeerimiskeele DAX (*Data Analysis Expressions*) abil. DAX on teek funktsioone ja operaatoreid, mida kasutatakse andmeanalüüsi teostamisel erinevatel Microsofti analüüsi platvormidel (*Power BI Desktop*, *Azure Analysis Services*, *SQL Server Analysis Services* ja *Power Pivot* Exceli keskkonnas) [6].

Käesoleva töö lõpptulem tehakse lõppkasutajale kättesaadavaks Power BI pilvekeskkonnas. Microsoft Power BI on ärianalüüsi teostamist võimaldav keskkond, mis hõlmab endas tööriistu andmete analüüsiks, selleks ettevalmistamiseks (puhastamiseks, agregeerimiseks), visualiseerimiseks ja lõpptulemi jagamiseks teiste kasutajatega [7].

3.2.2 Andmete olemus

Käesolevas näites analüüsitakse andmeid, mis on genereeritud laohaldusmooduli alamosa, skännermooduli abil. Skännermooduli moodustavad ühelt poolt füüsilisel kujul olemasolevad skännerid ja teiselt poolt programmikood ja andmebaas, millesse skänneri abil loodud info talletatakse.

Skänneriga registreeritakse erinevat tüüpi laotegevusi. Käesolevas töös on vaatluse all kaupade komplekteerimine ja väljastamine laost. Konkreetsetes lahendustes kasutatakse skännerimooduli logitabeli ridu, milles on märgitud tegevuseks komplekteerimine või komplekteerimistöö lõpetamine.

Iga noppimise või komplekteerimistöö lõpetamise kande real on tunnus, mis kellast ja millises lao asukohas konkreetne tegevus tehti, vöötkood, komplekteerimistöö ID ning kande unikaalne ID.

Vastavad tunnused olid töö autorile sisendiks laoliikumiste analüüsi teostamisel. Esmalt oli töö märkimisväärseks osaks andmete viimine analüüsitavale kujule. See tähendas andmete grupeerimist komplekteerimistöö alusel, seejärel asukohtade järjestamist nende külastamise järjekorras. Kirjeldatud töötlemisega tegeles töö autor Power BI keskkonnas. Alljärgnevalt on toodud näide DAX programmeerimiskeele rakendamisest asukohtade külastuse järjestamiseks grupeerituna komplekteerimistöö alusel (vt Joonis 2).

```
TimeRank =  
VAR CreatedTime = '#ScannerMovements'[CreatedDateTime_T0]  
VAR Route = '#ScannerMovements'[RouteId]  
RETURN  
    CALCULATE (  
        RANK.EQ ( CreatedTime; '#ScannerMovements'[CreatedDateTime_T0]; ASC );  
        FILTER ( ALL ( '#ScannerMovements' ); '#ScannerMovements'[RouteId] = Route )  
    )
```

Joonis 2. DAX koodi näide.

Seejärel lisas töö autor eraldi veeruna lähtepunkti asukoha tunnuse ja kellaaja, millal lähtepunktis viibiti. Nüüd olid olemas nii lähtepunkt, sihtpunkt, lähtepunktis viibimise aeg ja sihtpunkti jõudmise aeg. Viimaseks sammuks DAX poole peal oli liikumise ajalise kestuse arvutamine: lähtepunkti kellaaja lahutamine sihtpunkti jõudmise ajast.

Näide DAX programmeerimiskeelega loodud täiendavatest tunnustest (vt Joonis 3).

RouteID	Time Rank	WMSLocationID_FROM	CreatedDateTime_FROM	WMSLocationID_TO	CreatedDateTime_TO	Duration Seconds	WMSLocationID_FROM_COLUMN	WMSLocationID_TO_COLUMN	WMSLocationID_FROM_FLOOR	WMSLocationID_TO_FLOOR	WMSLocationID_FROM_ROW	WMSLocationID_TO_ROW
006753_181	1		00-00-00	23.01.2019 15:34:08								
006753_181	2	00-00-00	23.01.2019 15:34:08	07-01-02	23.01.2019 15:37:49	221	0	7	0	2	0	1
006753_181	3	07-01-02	23.01.2019 15:37:49	07-13-02	23.01.2019 15:39:48	119	7	7	2	2	1	13
006753_181	4	07-13-02	23.01.2019 15:39:48	07-04-02	23.01.2019 15:42:08	140	7	7	2	2	13	4
006753_181	5	07-13-02	23.01.2019 15:42:08	10-23-01	23.01.2019 15:43:44	96	7	10	2	1	13	23
006753_181	6	10-23-01	23.01.2019 15:43:44	10-18-03	23.01.2019 15:52:18	514	10	10	1	3	23	18
006753_181	7	10-23-01	23.01.2019 15:52:18	12-20-04	23.01.2019 15:59:04	406	10	12	1	4	23	20
006753_181	8	12-20-04	23.01.2019 15:59:04	20-01-01	23.01.2019 15:59:46	42	12	20	4	1	20	1
006761_181	1		00-00-00	23.01.2019 15:25:27								
006761_181	2	00-00-00	23.01.2019 15:25:27	00-00-00	23.01.2019 15:25:38	11	0	0	0	0	0	0
006761_181	3	00-00-00	23.01.2019 15:25:38	05-20-01	23.01.2019 15:30:25	287	0	5	0	1	0	20
006761_181	4	05-20-01	23.01.2019 15:30:25	14-05-02	23.01.2019 15:31:04	39	5	14	1	2	20	5
006761_181	5	14-05-02	23.01.2019 15:31:04	09-04-02	23.01.2019 15:32:37	93	14	9	2	2	5	4
006761_181	6	14-05-02	23.01.2019 15:32:37	20-01-01	23.01.2019 15:32:50	13	14	20	2	1	5	1

Joonis 3. Näide DAX programmeerimiskeele abil loodud täiendavatest tunnustest.

Nagu ka ülalpool toodud jooniselt (vt Joonis 3) näha, siis andmetega manipuleerimise käigus tekkisid read, millel on olemas sihtpunkt, kuid puudub lähtepunkt. Kuna tegemist on tehnilise töötluse tulemusena tekkinud ridadega, millel puudub analüüsiks vajalik sisu, siis edasises analüüsis jäeti need read välja. Allpool toodud tabelis (vt Tabel 1) on nimetatud lisatud tunnused ning nende selgitused.

Tabel 1. Argumenttunnuste selgitused.

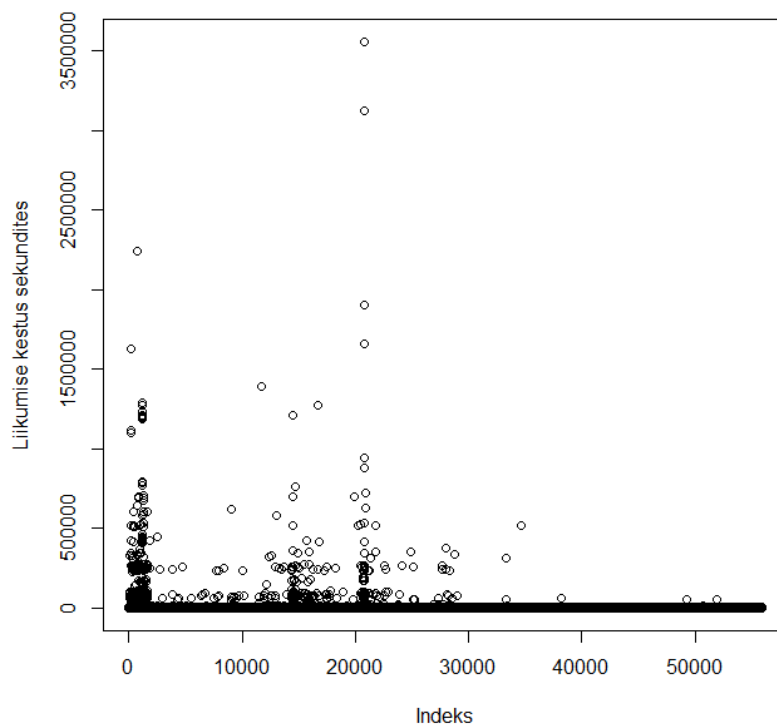
Tunnus	Selgitus
WMSLocationID_FROM	Laoliikumise lähtepunkti kood. Näiteks 16-02-04 tähistab 16. veeru 2. rea 4. korrust.
WMSLocationID_TO	Laoliikumise sihtpunkti kood. Näiteks 16-02-04 tähistab 16. veeru 2. rea 4. korrust.
WMSLocationID_FROM_COLUMN	Laoliikumise lähtepunkti veeru number.
WMSLocationID_TO_COLUMN	Laoliikumise sihtpunkti veeru number.
WMSLocationID_FROM_FLOOR	Laoliikumise lähtepunkti korruse number.
WMSLocationID_TO_FLOOR	Laoliikumise sihtpunkti korruse number.
WMSLocationID_FROM_ROW	Laoliikumise lähtepunkti rea number.
WMSLocationID_TO_ROW	Laoliikumise sihtpunkti rea number.
Difference_COLUMN	Lähte- ja sihtpunkti veergude numbriline erinevus (absoluutväärtus).

Difference_FLOOR	Lähte- ja sihtpunkti korruste numbriline erinevus (absoluutväärtus).
Difference_ROW	Lähte- ja sihtpunkti ridade numbriline erinevus (absoluutväärtus).

3.2.3 Andmete puhastamine

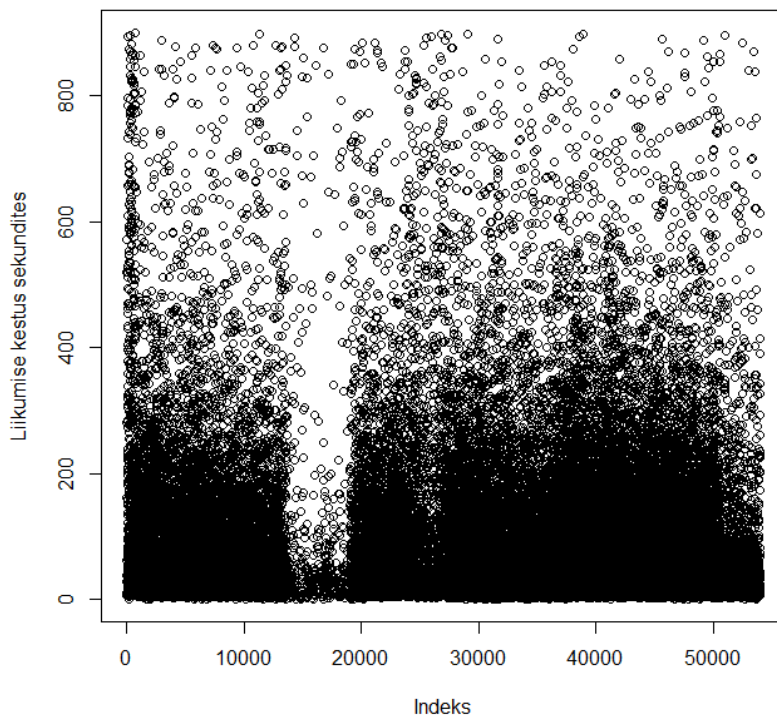
Käesolevas näites on tegemist on andmetega, milles esineb hulganisti vaatluseid, mis erinevad teistest suurel määral. Hälbed on seotud näiteks ühe komplekteerimistöö järgmisel päeval jätkamisega või komplekteerimistöö käigus väljastatud veateadetega. Nimetatud asjaoludest tulenevalt on tekkinud andmetesse kirjed, mida ei saa tõlgendada laosisesteks liikumisteks. Seetõttu ei saa mudeleid rakendada kõikidele saadaolevatele andmetele, vaid vajalik on täiendav andmete puhastamine.

Puhastamata andmeid on 55 913 rida. Ajaliselt on andmebaasi esimene kirje loodud 05.07.2018 ning aktiivselt on skannerlahendus kasutusse võetud 2018. aasta septembris. See tähendab, et ajaliselt on vaatlushetkeks (2019. aasta kevadeks) andmeid aktiivselt andmebaasi lisatud umbes kaheksa kuu pikkuse perioodi vältel. Nagu jooniselt näha (vt Joonis 4), on andmetes mitmeid väga suuri anomaaliaid. Lähtudes joonisest võib öelda, et kõige pikaajalisem liikumine laos on kestnud üle 3500000 sekundi, mis päevadeks teisendatuna on umbes 41 päeva. Seda konkreetset punkti võib kindlasti nimetada anomaaliaks.



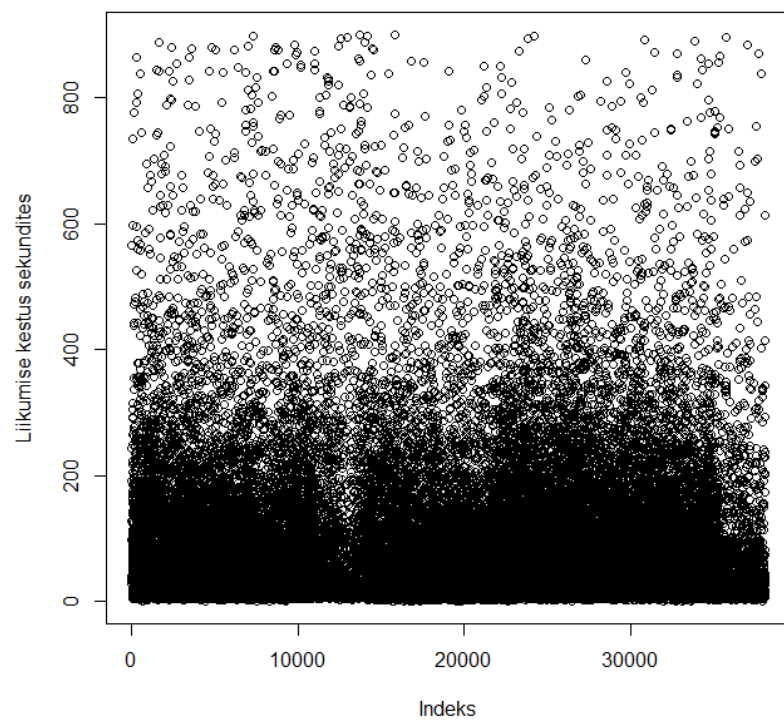
Joonis 4. Esialgsed andmed puhastamata kujul.

Seega esmalt eraldatakse andmetest read, milles on liikumise kestuseks üle 900 sekundi (15 minuti). Jättes nimetatud vaatlused välja, jääb andmetabelisse alles 54000 rida. Järgnevalt jooniselt (vt Joonis 5) on näha, et andmetes on teatav kõrvalekalle üldisest mustrist ca 15000. ja 20000. kirje vahel.



Joonis 5. Liikumised kestusega kuni 900 sekundit.

Andmetesse süüvides selgub, et tegemist ei ole kaupade liigutamist märkiva tegevusega, vaid laooperatsiooniga, mille käigus registreeritakse uusi aluseid. Seega jätab töö autor laoliikumiste mudeldamise eesmärgil need read välja. Samuti talitatakse käesolevas töös vaatlustega, mille lähte- ja sihtpunktiks on märgitud sama asukoht. Need read ei anna samuti liikumiste kirjeldamisel lisainfot ning kuuluvad kõrvaldamisele. Pärast andmete puhastamist on üldpilt analüüsitavatest andmetest oluliselt parem (vt Joonis 6). Analüüsitavaid andmeid on 38103 rida.



Joonis 6. Analüüsitavad andmed.

4 Konkreetse näite laopaigutuse analüüs ja mudeldamine

Käesolevas töös testitakse mitmeid statistilisi mudeleid hindamaks aega, mis kulub ühest lao asukohast järgmisesse liikumiseks - uuritav tunnus on pidev ja mittenegatiivse väärtusega. Sellest tulenevalt on käesolevas töös mudelite sobitamisel vaatluse all jaotused, mis on eelnimetatud omadustega. Käsitletakse üldistatud lineaarseid mudeleid, milles uuritavale tunnusele sobitatakse gammajaotus, lognormaaljaotus või Gaussi pöördjaotus. Käesoleva peatüki alapeatükkide 4.1–4.3 sisu aluseks on Gerhard Tutzi raamat „Regression for Categorical Data“ (kui ei ole viidatud teisiti) ([8], lk 21–113).

Üldistatud lineaarsete mudelite ülesehitus on väga sarnane lineaarsete mudelite struktuurile laiendades viimaste olemust:

- 1) Seos sõltuva ja sõltumatute tunnuste vahel ei pea olema identsusseos (nii, nagu tavalise lineaarse mudeli puhul). Käesolevas töös on sõltuvalt mudelist kasutatud lisaks identsusseosele ka logaritmilist, pöörd- ja pöördruutseost).
- 2) Kui lineaarse mudeli puhul on eeldus, et juhuslik komponent järgib normaaljaotust, siis üldistatud lineaarsete mudelite puhul on lubatud ka teisi eksponentsiaalsesse peresse kuuluvaid jaotusi.

4.1 Üldistatud lineaarsete mudelite üldkuju

Üldistatud lineaarsed mudelid sisaldavad järgmist kahte komponenti:

- 1) Süstemaatiline komponent

Süstemaatiline komponent näitab, kuidas uuritava tunnuse tinglik keskvärtus avaldub sõltumatute muutujate kaudu. Seos sõltumatute tunnuste lineaarkombinatsiooni ja tingliku keskvärtuse $\mu = E(y|x)$ vahel on määratud valemiga

$$g(\mu) = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta},$$

kus g tähistab seosefunktsiooni. Vektor $\mathbf{x}^T = (x_0, x_1, \dots, x_k)$ tähistab mudeli sõltumatuid muutujaid ja $x_0 = 1$ ning $\boldsymbol{\beta}^T = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$ on mudeli parameetrite

vektor, milles β_0 tähistab vabaliiget. Lineaarne osa, mis annab üldistatud lineaarsele mudelile nime, määrab, et muutujad \mathbf{x} lisatakse mudelisse lineaarsel kujul

$$\eta = \mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}.$$

Seosefunktsiooni pöördfunktsioon h avaldub

$$h(\eta) = \mu = h(\mathbf{x}^T \boldsymbol{\beta}).$$

2) Juhuslik komponent

Eeldatakse, et uuritava tunnuse jaotus kuulub eksponentsiaalsesse peresse, st tema tihedusfunktsioon (või diskreetsel juhul tõenäosusfunktsioon) on kujul

$$f(y|\theta, \phi) = \exp \left\{ \frac{y\theta - b(\theta)}{\phi} + c(y, \phi) \right\},$$

kus

θ on pere loomulik parameeter,

ϕ on skaala- ehk dispersiooniparameeter ja

$b(\cdot)$ ja $c(\cdot)$ on spetsiifilised funktsioonid, mis sõltuvad konkreetsest jaotusest.

Käesolevas töös rakendatakse järgmisi mittenegatiivseid pidevaid jaotusi: gammajaotus ja Gaussi pöördjaotus, mis kuuluvad eksponentsiaalsesse peresse, ning lognormaaljaotus (mille korral saab kasutada seost normaaljaotusega, mis kuulub eksponentsiaalsesse peresse). Diskreetsetest eksponentsiaalsesse peresse kuuluvatest jaotustest rakendati Poissoni jaotust.

4.2 Töös kasutatavad jaotused

Järgnevalt tutvustatakse jaotuseid, millele vastavaid mudeleid käesoleva töö analüüsi osas testitakse.

4.2.1 Normaaljaotus

Normaaljaotuse tihedusfunktsioon avaldub

$$\begin{aligned} f(y) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2 - \log(\sqrt{2\pi}\sigma)\right\} \\ &= \exp\left\{\frac{y\mu - \mu^2/2}{\sigma^2} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2} \log(\sqrt{2\pi}\sigma)\right\}. \end{aligned}$$

Seega loomulik parameeter θ ja funktsioon b on vastavalt

$$\theta(\mu) = \mu, b(\theta) = \theta^2/2 = \mu^2/2, \phi = \sigma^2.$$

4.2.2 Lognormaaljaotus

Juhuslik suurus on lognormaalse jaotusega, kui selle logaritmime tulemusel saadakse normaaljaotusega juhuslik suurus. Lognormaalse jaotuse tihedusfunktsioon avaldub kujul

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(y) - \mu}{\sigma}\right)^2\right).$$

4.2.3 Gammajaotus

Gammajaotuse tihedusfunktsioon on kujul

$$\begin{aligned} f(y) &= \frac{1}{\Gamma(v)} \left(\frac{v}{\mu}\right)^v y^{v-1} \exp\left(-\frac{v}{\mu}y\right) \\ &= \exp\left(\frac{-(1/\mu)y - \log(\mu)}{1/v} + v\log(v) + (v-1)\log(y) \right. \\ &\quad \left. - \log(\Gamma(v))\right). \end{aligned}$$

Sellest tuleneb eksponentsiaalsete jaotuste pere parameetriseerimine

$$\phi = 1/v, \theta(\mu) = -1/\mu, b(\theta) = -\log(-\theta).$$

4.2.4 Gaussi pöördjaotus

Nagu eelpool toodud mudelite puhul, on uuritav tunnus ka Gaussi pöördjaotust kasutavas mudelis rangelt mitte-negatiivne. Gaussi pöördjaotust märgitakse lühendiga $IG(\mu, \lambda)$, kus

$\mu, \lambda > 0$ on määravateks parameetriteks. Gaussi pöördjaotuse tihedusfunktsiooni üldkuju on

$$f(y) = \left(\frac{\lambda}{2\pi y^3}\right)^{1/2} \exp\left\{-\frac{\lambda}{2\mu^2 y}(y - \mu)^2\right\} \\ = \exp\left\{\frac{y(-1/(2\mu^2)) + 1/\mu}{1/\lambda} - \frac{\lambda}{2y} - \frac{1}{2}\log(\lambda 2\pi) - \frac{3}{2}\log(y)\right\}.$$

Seega

$$\theta = -\frac{1}{2\mu^2}, b(\theta) = -1/\mu = -\sqrt{-2\theta}, \phi = 1/\lambda.$$

4.2.5 Poissoni jaotus

Poissoni jaotus on defineeritud tõenäosusfunktsiooniga

$$f(y) = \frac{\lambda^y}{y!} \exp(-\lambda) = \exp\{y \log(\lambda) - \lambda - \log(y!)\}.$$

Ekspponentsiaalse pere parameetrid on $\theta(\mu) = \log(\mu)$, $b(\theta) = \exp(\theta) = \mu$, $\phi = 1$.

4.3 Mudelite sobivuse hindamine

Selleks, et hinnata, kui hästi sobib mudel andmete kirjeldamiseks või millist mudelit teistele eelistada, on mitmeid meetodeid. Alljärgnevalt on selgitatud mõnda töös kasutatutest.

Akaike informatsioonikriteerium

Üks võimalus, kuidas hinnata, milline kandidaatmudel sobib andmetega kõige paremini, on leida vastavate mudelite Akaike informatsioonikriteeriumi (edaspidi *AIC*) väärtused. Kõige paremini sobib mudel, mille *AIC* on väikseim. *AIC* leitakse järgmiselt

$$AIC = -2 \log L + 2p,$$

kus L tähistab tõepära ja p on mudeli parameetrite arv.

Erindid

Selleks, et leida vaatlusi, mis sõltuva muutuja poolest teistest oluliselt erinevad, analüüsitakse standardiseeritud ja studentiseeritud jääke. Standardiseeritud jäägid leitakse jääkide $r_i = y_i - \hat{y}_i$ jagamisel nende standardhälbega. Studentiseeritud jäägid leitakse sarnaselt standardjääkidele, kuid standardhälbe arvutamisel on konkreetne vaatlus i välja jäetud.

Erinditena käsitletakse töös vaatlusi, mille standard- või studentiseeritud jääk ületab kolme.

Mütsimaatriks

Mütsimaatriksi nime all tuntud $n \times n$ maatriks \mathbf{H} teisendab uuritava tunnuse väärtuste vektori \mathbf{y} mudeliga leitud hinnangute vektoriks $\hat{\mathbf{y}}$. Hinnangute vektor avaldub kujul

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{H}\mathbf{y},$$

kus

$$\mathbf{H} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T.$$

Mütsimaatriksi peadiagonaali elementide väärtuseid kasutatakse, et leida omapäraseid vaatlusi (ebatavaliste x väärtustega). Mütsimaatriksi peadiagonaali element h_{ii} , $0 \leq h_{ii} \leq 1$, näitab konkreetse y_i vaatluse mõju kõikidele mudeliga hinnatud väärtustele \hat{y}_i . Kui $h_{ii} = 1$, siis $\hat{y}_i = y_i$ – mudel hindab konkreetse vaatluse uuritava tunnuse väärtuse täpselt. ([9], lk 17)

Mütsimaatriksi peadiagonaali elementide summa võrdub mudeli parameetrite arvuga (kaasa arvatud vabaliige). Olukorrad, millele tuleb tähelepanu pöörata, on need, kus esinevad mõningad väga suured mütsimaatriksi väärtused. ([10], lk 534)

Käesolevas töös peetakse omapärasteks vaatlusi, mille vastav mütsimaatriksi element h_{ii} ületab keskmist kolmekordselt.

Cook'i kaugus

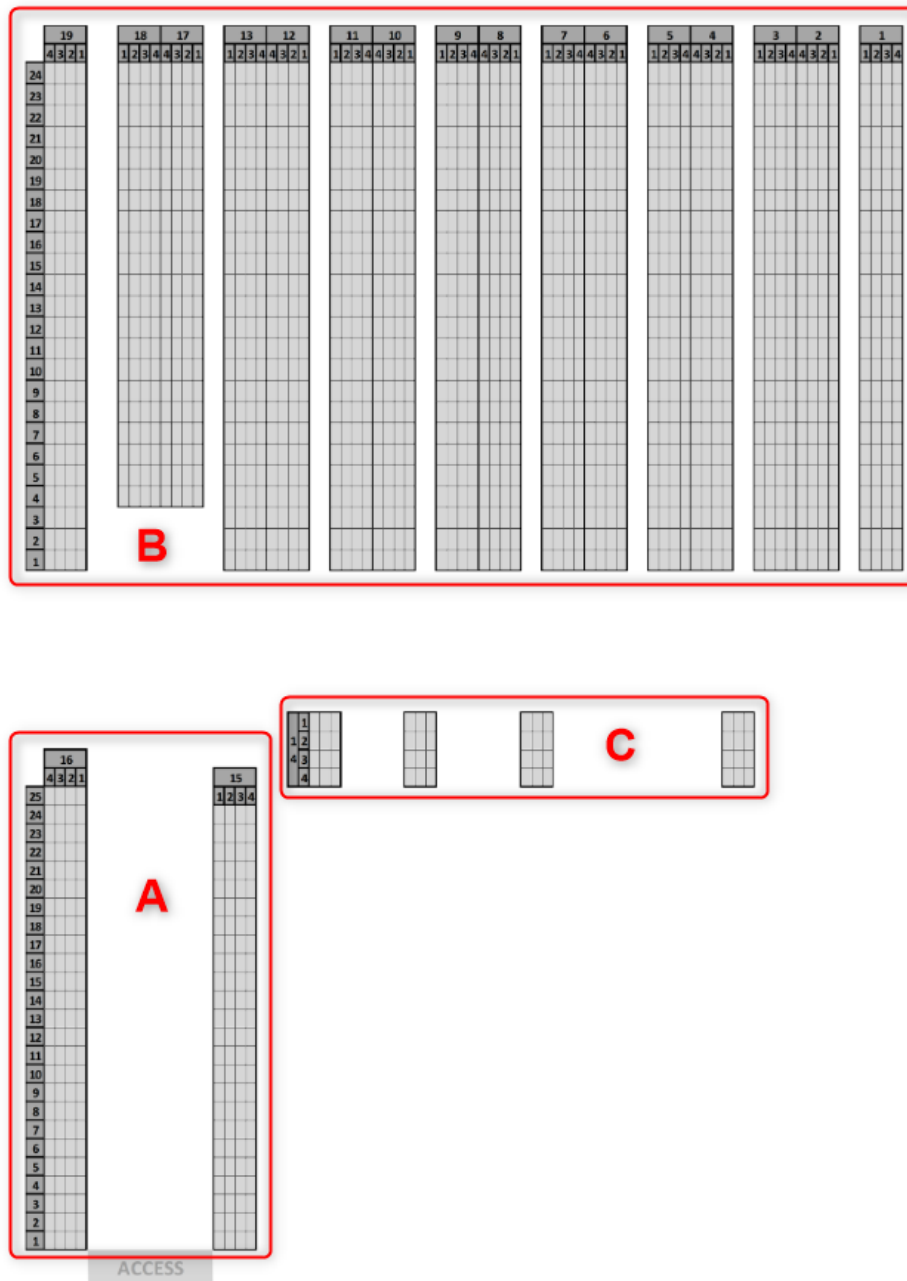
Enimtuntud meetod mõjukate vaatluste hindamiseks on nende Cook'i kauguse leidmine ([10], lk 534). Cook'i kaugus hindab muutust mudeli sõltuva muutuja väärtustes, kui konkreetne y_i vaatlus andmetest kõrvaldada. Cook'i kaugus avaldub kujul

$$C_i = (\hat{\beta}_{(i)}^* - \hat{\beta})^T \text{cov}(\hat{\beta})^{-1} (\hat{\beta}_{(i)}^* - \hat{\beta}) = (\hat{\beta}_{(i)}^* - \hat{\beta})^T \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X} (\hat{\beta}_{(i)}^* - \hat{\beta}),$$

kus $\hat{\beta}_{(i)}^*$ tähistab hinnangut esimesel iteratsiooni sammul (ilma i -nda vaatluseta). \mathbf{X}^T on transponeeritud disainimaatriks ning $\mathbf{W} = \mathbf{D}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{D}$ on kaalumaatriks, kus $\mathbf{D} = \text{Diag}(\partial h(\eta_1)/\partial \eta, \dots, \partial h(\eta_n)/\partial \eta)$ on tuletiste diagonaalmaatriks ja $\mathbf{\Sigma} = \text{Diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2)$ on kovariatsioonimaatriks, milles $\sigma_i^2 = \text{var}(y_i)$.

4.4 Laoliikumiste kestuse mudel

Käesolevas alapeatükis käsitletakse laoliikumisteks kuluvat aega, võttes aluseks, et vaadeldava lao asukohad jagunevad kolme plokki (vt Joonis 7).

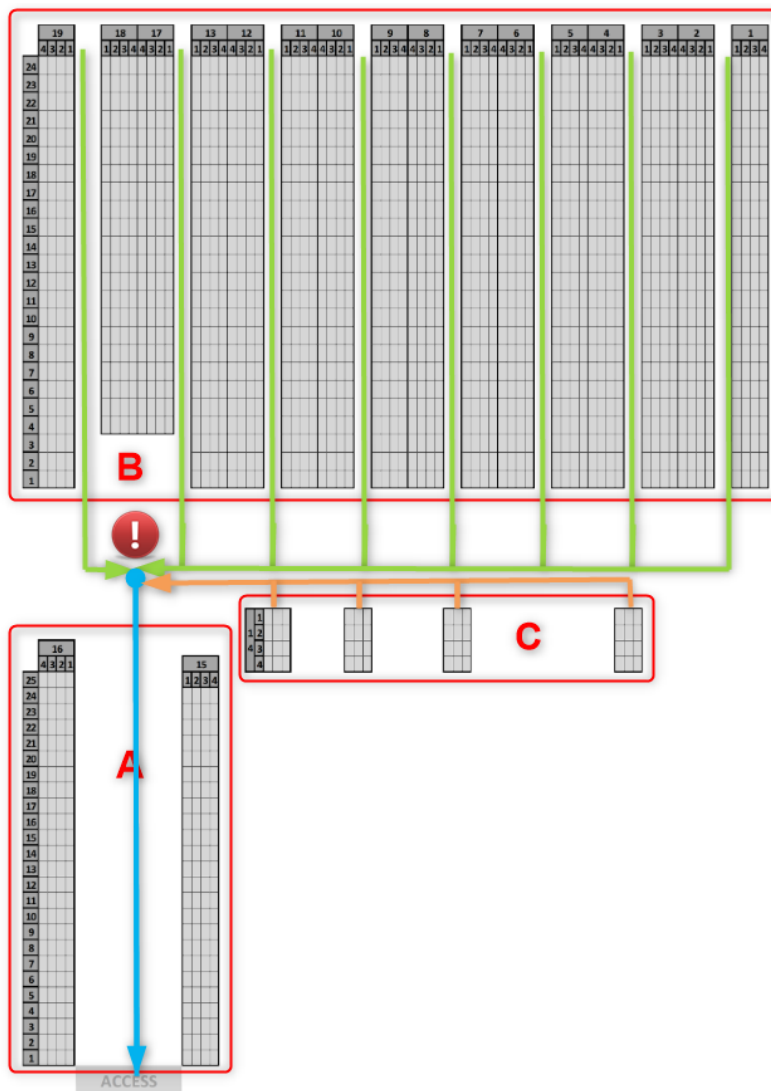


Joonis 7. Laoliikumiste jagamine plokkidesse.

Plokkideks jagamine siinkohal tähendab, et konkreetses plokkis toimunud laoliikumisi analüüsitakse teistest plokkidest erineva loogika alusel. Selline lähenemine on asjakohane, kuna on selge, et liikumiste iseloomud A, B ja C piirkondades on erinevad.

A plokis toimub liikumine ühe vahekäigu raames. B plokis toimub liikumine lisaks vahekäiguisestele liikumistele ka erinevate vahekäikude vahel. C ploki liikumised on teistest plokkidest erinevad, kuna riulid on asetatud teistpidi – laoplaani pealtvaate mõistes tähendab see, et A ja B plokis jooksevad riulite numbrid vertikaalselt, kuid C plokis horisontaalselt (vt Lisa 1, Joonis 18). Lisaks teistpidisele paigutusele järgneb C plokis igale kolmele riulile tühimik.

Lähtuvalt nimetatud põhjustest, mudeldati laoliikumisi igas plokis eraldi. C ploki asukohtadest väljastusalani jõudmise aja leidmiseks liidetakse aeg, mis kulub C plokis A ploki lõpuni (joonisel tähistatud hüüumärgiga) (vt Joonis 8) jõudmiseks ja seejärel aeg, mis kulub A ploki läbimiseks. Sama loogika alusel arvutatakse ka B plokist väljastusalani jõudmise aeg.



Joonis 8. Mudelite resultaatide liitmine.

Iga ploki laoliikumiste kestuse mudeldamisel katsetati kolme jaotust: lognormaalne jaotus, gammajaotus ja Gaussi pöördjaotus. Järgnevalt selgitatakse, kuidas lõplike mudeliteni jõuti, kuidas neid interpreteeriti ning tulemused lõppkasutajale kättesaadavaks tehti.

4.4.1 Lisatud tunnused

Infosüsteemis varasemalt defineeritud asukohtade numeratsioon ei peegelda otseselt füüsilist laoplaani. Näiteks on ühest vahekäigust ligipääsetavad veerud numbritega 13 ja 17 (vt Lisa 1, Joonis 18) ning veergude 17 ja 18 esimene riiul asub sama kaugel kui teiste B ploki veergude neljas riiul. Selleks, et võimaldada mudelite paremat sobivust, lisati andmetele täiendavaid tunnuseid (vt Tabel 2), mis püüavad tegelikke laoliikumisi rohkem arvesse võtta. Täpsem selgitus täiendavatest tunnustest ja nende lisamise vajalikkusest on leitav lisast (vt Lisa 2, Lisa 3).

Tabel 2. Täiendavalt lisatud tunnused.

Tunnus	Lisamise põhjus
aisle_FROM_correct; aisle_TO_correct; aisleDiff	Peegeldada rohkem tegelikke laoliikumisi (järjestikku asetsevad veerud ei pruugi olla ligipääsetavad samast vahekäigust) (vt Lisa 3, Joonis 20).
fakeColumnNumber_TO; fakeColumnNumber_FROM; fakeColumnDiff	Vajadus, et veeru number annaks rohkem infot selle füüsilisest asukohast laos.
fakeRowNumber_TO; fakeRowNumber_FROM; fakeRowDiff	Vajadus viia veergude number 17 ja 18 riiulite (ridade) numeratsioon vastavusse teiste B ploki veergudega.
fakeRowDiff_total	Kui B plokis liikumine algas ja lõppes erinevates vahekäikudes, siis: riiulite arv, millest mööduti = lähtepunkti riiuli number + sihtpunkti riiuli number

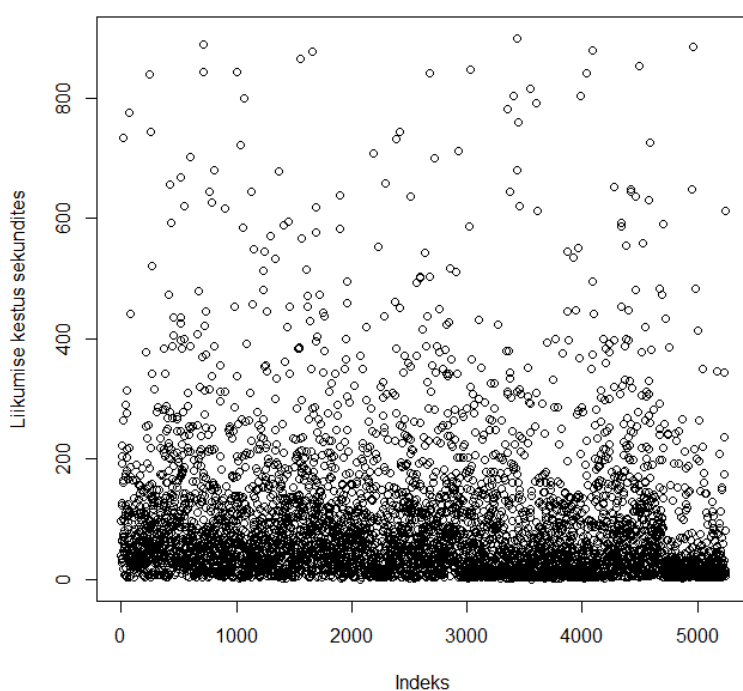
4.4.2 Plokk A

Ploki A asukohtadest väljastusalani jõudmiseks kuluva aja mudeldamisel võeti aluseks kõik laoliikumised, mis on tehtud ühe vahekäigu piires (sealhulgas ka B ploki vahekäigud, kuid mitte C). Analüüsitavatele andmetele määrati järgmised kitsendused (vt Tabel 3).

Tabel 3. Plokk A liikumiste kestuse analüüsil andmetele määratud kitsendused.

Kitsendus R koodis	Selgitus
aisle_FROM_correct == aisle_TO_correct	Liikumise lähte ja sihtpunkt peavad asuma samas vahekäigus.
WMSLocationID_TO_COLUMN!=14 & WMSLocationID_FROM_COLUMN!=14	Välistatakse liikumised, mis on seotud veeruga number 14. Põhjuseks selle füüsilise paigutuse erinevuse teistest veergudest.

Rakendades andmetele ülaltoodud piiranguid (vt Tabel 3), jääb ühe vahekäigu piires toimunud liikumiste kestuse analüüsiks alles 5243 rida andmeid. On võetud eelduseks, et vahekäigusesed liikumised on kõikides vahekäikudes sarnased.



Joonis 9. A ploki liikumiste kestust kirjeldavad andmed.

Sobitati lognormaaljaotusega mudelit, gammajaotusega mudelit (identsus-, log- ja pöördseosega) ning Gaussi pöördjaotusega mudelit (logaritmilise seosega).

A ploki puhul sobis andmetega kõige paremini üldistatud lineaarne mudel, mille uuritav tunnus järgib lognormaalset jaotust. Allpool on täpsemalt selgitatud, millised tunnused on liikumise kestuse kirjeldamisel olulised ning miks lognormaalne jaotus valikust parimaks osutus.

Lognormaalne jaotus

Lognormaalse jaotusega mudeli puhul logaritmitakse uuritavat tunnust ja rakendatakse tavalist lineaarset mudelit identsusseosega. Testides lognormaalse jaotuse sobivust A ploki andmetele, testiti mudelis esmalt argumenttunnustena lähte ja sihtpunkti korruste vahet (*Difference_FLOOR*), lähtepunkti korruse numbrit (*WMSLocationID_FROM_FLOOR*), sihtpunkti korruse numbrit (*WMSLocationID_TO_FLOOR*), lähte- ja sihtpunkti ridade vahet (*fakeRowDiff*), lähte- ja sihtpunkti veergude vahet (*fakeColumnDiff*). Ilmnes, et korruste vahe ei ole oluline tunnus. Järgmiseks jäeti nimetatud tunnus mudelist välja ning saadi järgmised parameetrite hinnangud (vt Tabel 4).

Tabel 4. Lognormaalse jaotusega üldistatud lineaarse mudeli parameetrite hinnangud.

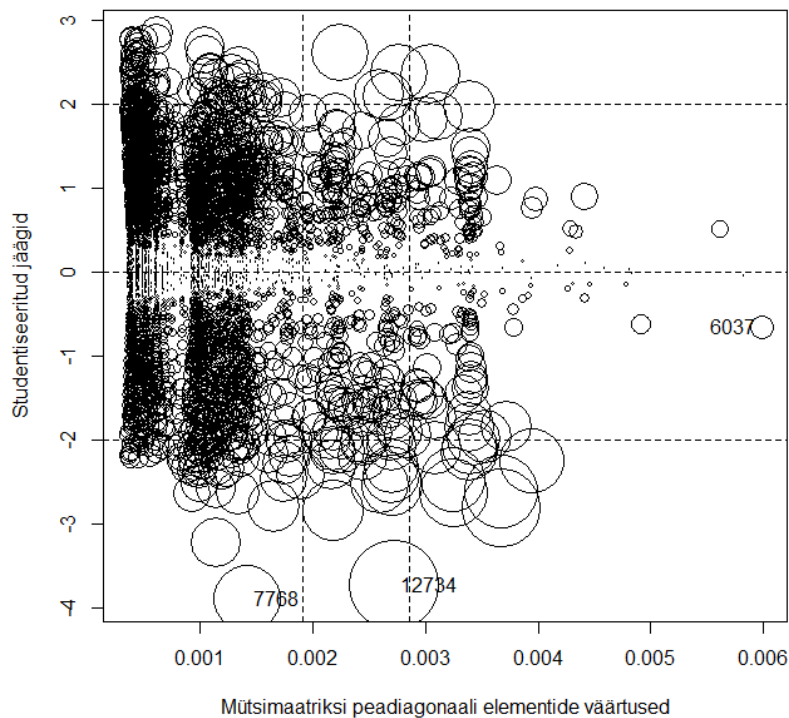
```

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    3.154891   0.047160  66.898 < 2e-16 ***
WMSLocationID_FROM_FLOOR 0.082412   0.021396   3.852 0.000119 ***
WMSLocationID_TO_FLOOR  0.138942   0.022121   6.281 3.63e-10 ***
fakeRowDiff      0.051042   0.003526  14.477 < 2e-16 ***
fakeColumnDiff    0.085811   0.007882  10.887 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Kuna vaadeldavas valimis on fookuses ainult ühes vahekäigus toimunud liikumised, siis uue veergude numeratsiooni kohaselt saab veergude vahe olla kas 0 või 5 – liikumine algas ja lõppes samas veerus (veerunumbrite erinevus 0), või sama vahekäigu teises veerus (veeru numbrite erinevus 5).

Selleks, et kontrollida, kui hästi saadud mudel andmetega sobib, viidi läbi mudeli jääkide analüüs (vt Joonis 10). Jooniselt on näha, et studentiseeritud jäägid on üsna ühtlaselt jaotunud 2 ja -2 vahele. Esineb jääke, mis neid piire ületavad (199 vaatlust), kuid andmemahtu arvestades (5243 vaatlust) ei ole see probleemiks. Kolm studentiseeritud jääki on absoluutväärtuselt 3 ja 4 vahel.



Joonis 10. A ploki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid.

Et hinnata, kas esineb andmeridu, mis erinevad teistest argumenttunnuste vaatevinklist lähtuvalt, kontrollitakse mütsimaatriksi elementide väärtuseid. Selgub, et on 26 vaatlust, mille argumenttunnused on teistest vaatlustest oluliselt erinevad. Kui mütsimaatriksi elementide keskvärtus antud juhul on 0,00095, siis nimetatud 26-st vaatlusest suurimaks on 0,006. Ülejäänud 25 vaatlust jäävad vahemikku 0,004-st 0,006-ni. Nende 26 vaatluse põhjal ei ole alust arvata, et need mudeli parameetrite hindamist tugevalt mõjutaksid. Viimase asjaolu kontrollimiseks vaadeldi Cook'i kaugust. Mõjukate vaatluste leidmiseks kasutati käesolevas töös R-i graafilist funktsionaalsust (vt Lisa 4, Joonis 21), millelt on näha, et ühtegi liiga mõjukat vaatlust ei esine.

Gammajaotus

Nii nagu lognormaalse jaotuse puhul, on ka gammajaotusega mudelis olulisteks argumentideks lähte- ja sihtpunkti korrused, riulinumbrite erinevus ning veergude erinevus. Gammajaotusega juhusliku suuruse keskvärtuse seosefunktsiooniks testiti identsusseost, pöördseost ja logaritmilist seost. Erineva seosefunktsiooniga gammajaotusega mudeleid võrreldi omavahel *AIC* alusel ning kõige parema tulemuse

andis identsusseos (vt Tabel 5). Võrreldes mudelite sobivust jääkide alusel, osutus gammajaotust kasutavatest kandidaatmudelitest parimaks pöördseos, mille standardiseeritud jäägid jäid 8 piirimaile, kui identsus- või logaritmilise seosega mudelitel ulatusid need üle 10. Seega kokkuvõtvalt öeldes sobituvad gammajaotusega mudelid antud valimi andmetega oluliselt kehvemini kui lognormaalse jaotusega mudel.

Gaussi pöördjaotus

Ka Gaussi pöördjaotuse puhul on mudelisse sisse jäetud olulised tunnused samad, mis lognormaalse ja gammajaotusega mudelitel. Seosefunktsioonina kasutati logaritmilist seost. Võrreldes mudeli tulemusi lognormaaljaotusel ja gammajaotusel baseeruvate mudelitega, siis *AIC* alusel sobitus Gaussi pöördjaotusega mudel gammajaotusega mudelist paremini, kuid lognormaalse jaotusega mudelist halvemini (vt Tabel 5). Logaritmilise seosefunktsiooniga mudeli paremust kinnitas ka jääkide joonistelt nähtu.

Mudelite võrdlus

Hinnates kandidaatmudelite võimekust sobitada valimi andmetega, ilmneb, et ploki A puhul on parimaks valikuks lognormaalse jaotusega mudel. Viimase parimat sobivust kinnitavad nii *AIC* tulemused kui ka mudelite jääkide analüüs.

Tabel 5. A ploki kandidaatmudelite *AIC* väärtused.

Mudel	<i>AIC</i> väärtus
Lognormaalne jaotus	56615,09
Gammajaotus, identsusseos	57296,96
Gammajaotus, pöördseos	57356,12
Gammajaotus, logaritmiline seos	57322,75
Gaussi pöördjaotus, logaritmiline seos	57089,63

Parima mudeli interpreteerimine

Lognormaalset jaotust järgiv mudel on interpreteeritav järgmisele kujule:

$$\begin{aligned} \text{Duration. Seconds} = & \exp (3,1549 \\ & + 0,0824 * \text{WMSLocationID_FROM_FLOOR} \\ & + 0,1389 * \text{WMSLocationID_TO_FLOOR} \\ & + 0,0510 * \text{fakeRowDiff} \\ & + 0,0858 * \text{fakeColumnDiff}). \end{aligned}$$

Rakenduse koodi kirjutamisel ploki A asukohtadest väljastusalani jõudmise aja leidmiseks fikseeritakse lõpp-punkt (väljastusala), lähtepunktideks on ploki A kõik asukohad. Väljastusala asukoha nummerdamisel lähtutakse laoplaani täiendatud numeratsioonist: veerunumbriks määratakse 93 (90 ja 95 vahel; vt Lisa 2, Joonis 19), riiuli numbriks 1, korruse numbriks 1.

4.4.3 Plokk B

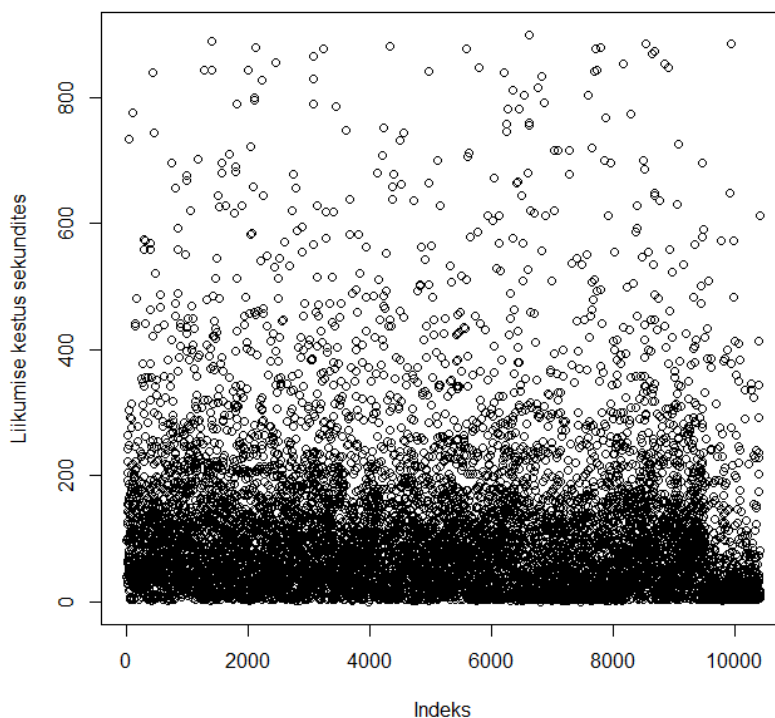
Liikumiste kestuse analüüsimiseks on välja valitud read, mille lähte- ja sihtpunkt asuvad laoplaanilt vaadatuna B plokis (vt Joonis 7). See tähendab, et ploki B puhul arvestatakse ka liikumisi, mis algavad ja lõppevad plokisiselt erinevates vahekäikudes. Analüüsitavatele andmetele määrati järgmised kitsendused (vt Tabel 6).

Tabel 6. Ploki B liikumiste kestuse analüüsil andmetele määratud kitsendused.

Kitsendus R koodis	Selgitus
(data\$aisle_TO_correct>=1& data\$aisle_TO_correct<=8)& (data\$aisle_FROM_correct>=1& data\$aisle_FROM_correct<=8)	Liikumise lähte ja sihtpunkti vahekäigu numbrid peavad jääma vahemikku 1-st 8-ni (vt Lisa 3, Joonis 20).
fakeColumnNumber_FROM!=14 & fakeColumnNumber_TO!=14	Eelmise kitsendusega jäid analüüsitavate kirjetena sisse ka veeruga 14 seotud liikumised. Veeruga 14 seotud liikumised tuleb ploki B liikumiste analüüsist välistada.

Rakendades nimetatud kitsendusi (vt Tabel 6), kirjeldavad ploki B liikumisi 10434 rida (vt Joonis 11). Liikumiste mudeldamisel kasutati samasid jaotusi ja seosefunktsioone, mis ploki A puhulgi.

Samuti B ploki liikumiste kestuse mudeldamisel osutus kõige paremini andmetega sobivaks lognormaalsel jaotusel baseeruv mudel. Järgnevalt on täpsemalt selgitatud, kuidas selliste tulemusteni jõuti.



Joonis 11. Ploki B liikumiste kestus.

Lognormaalne jaotus

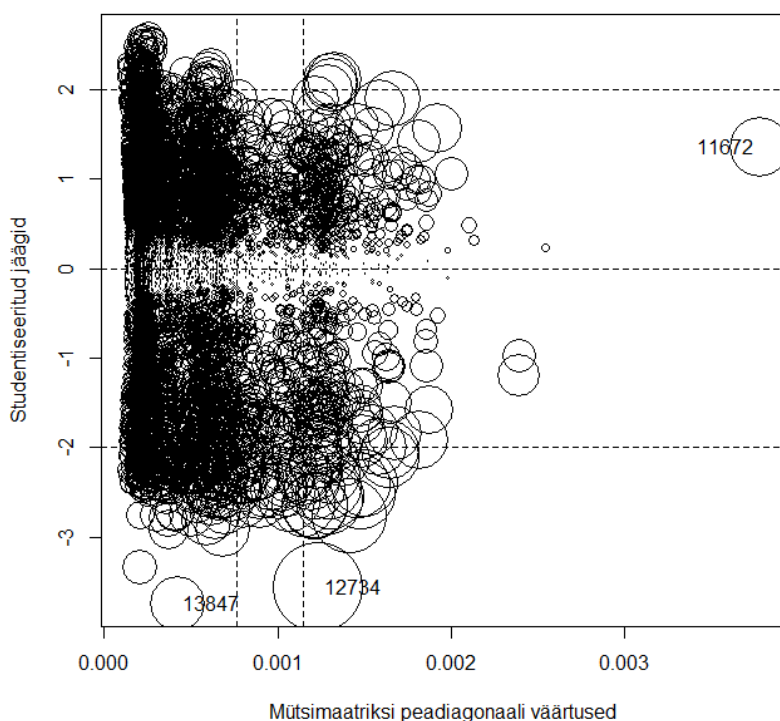
Lognormaalse jaotuse puhul osutusid B ploki mudelis olulisteks tunnusteks sihtpunkti korruse number (*WMSLocationID_TO_FLOOR*), ridade arv, millest liikumise jooksul mööduti (*fakeRowDiff_total*) ning lähte- ja sihtpunkti vahekäikude erinevus (*aisleDiff*). Vastavad parameetrite hinnangud on järgmised (vt Tabel 7):

Tabel 7. Ploki B lognormaalsel jaotusele baseeruva mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.634157	0.027837	130.553	< 2e-16	***
WMSLocationID_TO_FLOOR	0.106173	0.015077	7.042	2.01e-12	***
fakeRowDiff_total	0.014382	0.001211	11.874	< 2e-16	***
aisleDiff	0.095197	0.010915	8.722	< 2e-16	***

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Järgnevalt viidi läbi mudeli jääkide analüüs. Esmapilgul hinnates (vt Joonis 12) võib öelda, et jääkide joonis on ootuspärane.



Joonis 12. B ploki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid.

Enamik studentiseeritud jääkide väärtuseid on 2 ja -2 vahel, neid piire ületavad 483 vaatlust, mis moodustavad ligikaudu 5% kõikidest B ploki vaatlustest. Jääke, mis ületavad kolme piiri, on 3, kuid arvestades andmemahutu, ei ole see probleemiks. Omapäraste vaatluste leidmiseks viidi läbi mütsimaatriksi peadiagonaali elementide analüüs, millest selgus, et esineb 101 vaatlust (0,9% kõikidest B ploki vaatlustest), mille mütsimaatriksi peadiagonaali elemendi väärtus ületab rohkem kui kolmekordselt elementide keskmist (0,0004). Maksimaalne mütsimaatriksi elemendi väärtus on 0,004.

Analüüsi ka mõjukaid vaatlusi Cook'i kaugusega vastavalt graafikult (vt Lisa 4, Joonis 22), millelt on näha, et mõjukad vaatlused puuduvad. Nimetatud asjaolule aitab kindlasti kaasa suur andmemah.

Gammajaotus

Kandidaatmodelitest, mille juhuslikku suurust kirjeldab gammajaotus, sobitus *AIC* alusel B plokki andmetega kõige paremini identsusseosega mudel. Analüüsides aga jääke, siis identsusseosega mudelil esines ainsana jääke, mille väärtus ületas kümnet. Seega ei ole põhjust anda hinnangut, et identsusseosefunktsiooniga mudel on gammajaotusega mudelitest parim. Kuna lognormaalse jaotusega mudel andis käesoleval juhul oluliselt täpsemaid tulemusi kui gammajaotusega mudel, siis siinkohal gammajaotusega mudelitest parima väljaselgitamine ei ole määrava tähtsusega.

Gaussi pöördjaotus

B plokki puhul andis kandidaatmodelitest kõige ebatäpsemaid tulemusi mudel, mis põhines logaritmilise seosega Gaussi pöördjaotusel. Võrreldes mudeli jääke eelnevalt analüüsitud mudelite jääkidega, ilmnes, et siinkohal on tegemist oluliselt tagasihoidlikemate tulemustega kui lognormaalse jaotusega mudeli puhul ning seega sügavamaks analüüsiks ei ole vajadust.

Mudelite võrdlus

Nagu eelnevalt välja toodud, siis plokki B liikumiste kestuse mudeldamisel on parimaks valikuks lognormaalse jaotusega mudel. Nimetatud asjaolu kinnitavad nii *AIC* väärtused kui ka jääkide joonised.

Tabel 8. B plokki kandidaatmodelite *AIC* väärtused.

Mudel	AIC väärtus
Lognormaalne jaotus	118057,9
Gammajaotus, identsusseos	118168,9
Gammajaotus, pöördseos	118245,0
Gammajaotus, logaritmiline seos	118204,8
Gaussi pöördjaotus, logaritmiline seos	119447,3

Parima mudeli interpreteerimine

Lognormaalset jaotust järgiv mudel on interpreteeritav järgmiselt:

$$\begin{aligned} \text{Duration.Seconds} = & \exp(3,634 \\ & + 0,1062 * \text{WMSLocationID_TO_FLOOR} \\ & + 0,0144 * \text{fakeRowDiff_total} \\ & + 0,0952 * \text{aisleDiff}). \end{aligned}$$

Ploki B asukohtadest väljastusalani jõudmise aja leidmiseks fikseeritakse plokisisene sihtpunkt, mis on lähim punkt väljastusalale (vt Joonis 8, tähistatud hüüumärgiga). Taaskord lähtutakse laoplaani täiendatud numeratsioonist: sihtpunkti vahekäigu numbriks määratakse tehislikult 7,5 (7 ja 8 vahel; vt Lisa 3, Joonis 20), riuli numbriks 1 ning korruse numbriks 1. Et leida väljastusalani jõudmiseks kuluvat aega, liidetakse B ploki sees toimuvatele liikumiste kestustele ploki A läbimiseks kuluv aeg (leitud A ploki mudeliga).

4.4.4 Plokk C

C ploki liikumised moodustavad võrrelduna teiste plokkidega kõige väiksema osa laoliikumistest. Põhjus, miks C ploki liikumistele on vaja konstrueerida eraldi mudel, on nähtav laoplaanilt (vt Lisa 1, Joonis 18). Nimelt asub veerg numbriga 14 võrrelduna teiste veergudega 90kraadise nurga all ning riiulid ei ole paigutatud pideva jadana.

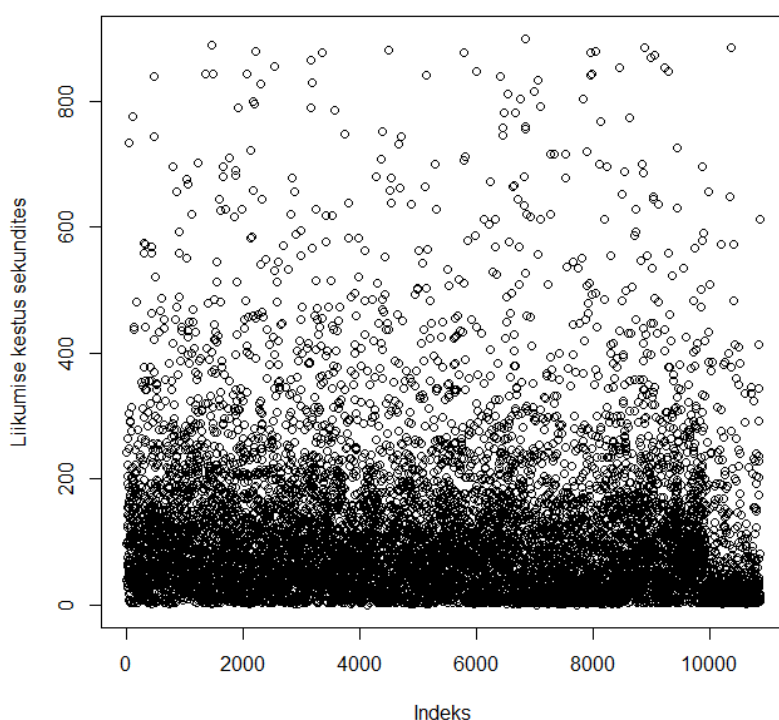
Laoplaanilt on aga näha (vt Lisa 3, Joonis 20), et B ploki vahekäigud on vastavuses C ploki riiulite asukohtadega. Seega lisatakse C ploki riiulitele (vt Lisa 1, Joonis 18) kolme kaupa vastav vahekäigu tunnus.

Kuna vahekäikude ja korruste tunnused käituvad C ploki puhul sarnaselt B ploki vastavatele tunnustele, kaasatakse C ploki mudeldamisse ka B ploki liikumised. Analüüsitavatele andmetele seati järgnevad kitsendused (vt Tabel 9).

Tabel 9. Plokk C liikumiste kestuse analüüsil andmetele määratud kitsendused.

Kitsendus R koodis	Selgitus
(aisle_TO_correct>=1&aisle_TO_correct<=8) & (aisle_FROM_correct>=1&aisle_FROM_correct<=8)	Lähte- ja sihtpunkt peavad asuma vahekäikudes 1-8 (vt Lisa 3, Joonis 20).

Pärast kitsenduste rakendamist on analüüsitavaid andmeid 10858 rida (vt Joonis 13).



Joonis 13. Ploki C liikumiste kestus.

C ploki puhul ei võetud mitte ühtegi kandidaatmudelisse argumenttunnusteks veerunumbreid, kuna veerg 14 asub teiste veergudega võrreldes teistpidi (plaanilt vaadatuna horisontaalselt). Samuti jäetakse välja ridade argumenttunnused, kuna B ja C ploki puhul ei ole need võrreldavad. Nii nagu kahe eelnevalt analüüsitud ploki puhul, sobitub ka C ploki andmetega kõige paremini lognormaalse jaotusega mudel.

Lognormaalne jaotus

Lognormaalse jaotuse puhul jäid oluliste tunnustena mudelisse sisse sihtpunkti asukoha korrus (*WMSLocationID_TO_FLOOR*), vahekäikude erinevus (*aisleDiff*) ja korruste

erinevus (*Difference_FLOOR*) (vt Tabel 10). Tabelist on näha, et suurimaks liikumise ajalise kestuse mõjutajaks konkreetsel juhul on vahekäikude erinevus.

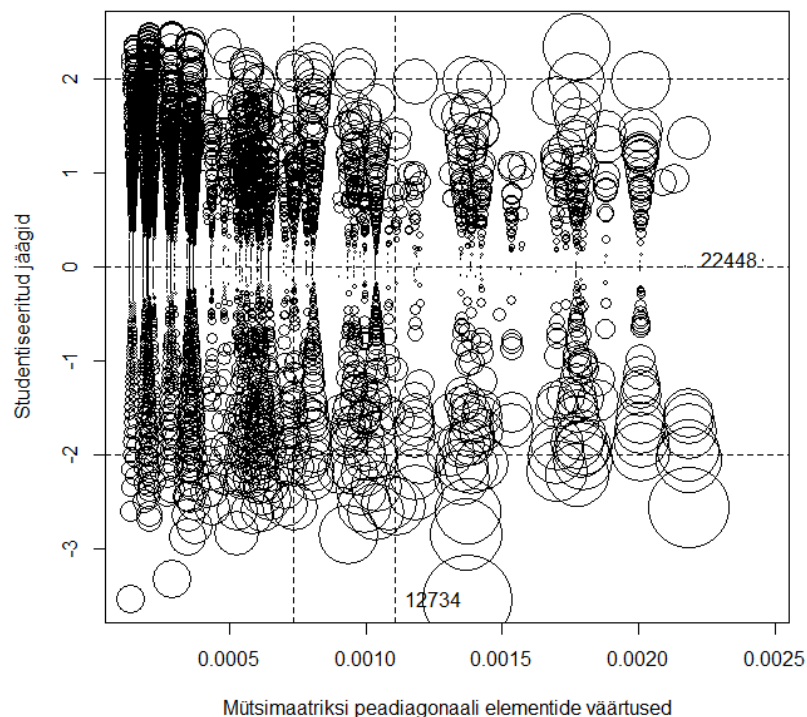
Tabel 10. C ploki lognormaalse jaotusega mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.753435	0.026393	142.216	< 2e-16	***
WMSLocationID_TO_FLOOR	0.087943	0.017640	4.985	6.28e-07	***
Difference_FLOOR	0.049838	0.017467	2.853	0.00434	**
aisleDiff	0.167671	0.008738	19.189	< 2e-16	***

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Hinnates mudeli võimet sobituda andmetega, vaadeldakse esmalt jääkide iseloomu peegeldavaid jooniseid. Joonistelt (vt Joonis 14) on näha, et lognormaalne jaotus sobitub andmetega võrdlemisi hästi. Jääke, mille absoluutväärtus ületab kolme, on 3. Samas, kui vaatlusi, mille studentiseeritud jäägi absoluutväärtus ületab 2, on 483 (ligikaudu 4% valimi vaatlustest).



Joonis 14. C ploki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid.

Hinnatakse ka mõjukaid vaatlusi ning potentsiaalseid erindeid. Võttes aluseks Cook'i kauguse hinnangu, ei esine ühtegi liiga mõjukat vaatlust (vt Lisa 4, Joonis 23).

Gammajaotus

Gammajaotusega mudelitest testiti C ploki puhul logaritmilist, identsus- ja pöördseost. Nimetatutest andis kõige parema tulemuse identsusseosega mudel. Kui *AIC* väärtused olid kõikidel väga ligilähedased, siis otsustavaks sai mudelite standardiseeritud jääkide võrdlus. Kõigil kolmel jääkide joonisel on näha, et on mitmeid jääke, mille väärtus ületab 2, kuid kõige kehvema tulemuse mõjukate andmepunktide osas annab pöördseosega mudel ning seosefunktsioonidest parimaks osutub identsusseos.

Gaussi pöördjaotus

Konkreetsel juhul testiti Gaussi pöördjaotusega mudelites identsusseost ja logaritmilist seost. Võrreldes mudelite jääkide jooniseid, ei ilmnenud väga suuri erisusi, mille põhjal üht Gaussi pöördjaotusega mudelit teisele eelistada. Küll aga võib öelda, et mõlemad kandidaatmudelid sobitusid andmetega võrdlemisi kehvasti – esines standardiseeritud jääke, mis ületasid seitset.

Mudelite võrdlus

Nagu A ja B ploki puhul, osutus ka siin parimaks lognormaalse jaotusega mudel. Nimetatud valiku kasuks otsustati eelkõige tulenevalt jääkide analüüsist, aga võrreldi ka *AIC* väärtuseid (vt Tabel 11).

Tabel 11. C ploki kandidaatmudelite *AIC* väärtused.

Mudel	AIC väärtus
Lognormaalne jaotus	123062,2
Gammajaotus, logaritmiline seos	123141,9
Gammajaotus, identsusseos	123114,2
Gammajaotus, pöördseos	123160,9
Gaussi pöördjaotus, logaritmiline seos	124420,0
Gaussi pöördjaotus, identsusseos	124413,2

Parima mudeli interpreteerimine

Lognormaalset jaotust järgiv mudel on interpreteeritav järgmisele kujule:

$$\begin{aligned} \text{Duration.Seconds} = & \exp (3,7534 \\ & + 0,0879 * \text{WMSLocationID_TO_FLOOR} \\ & + 0,0498 * \text{Difference_FLOOR} \\ & + 0,1677 * \text{aisleDiff}). \end{aligned}$$

C ploki asukohtadest väljastusalani jõudmise aja leidmiseks fikseeritakse esmalt punkt, mis asub laoplaanilt vaadatuna C plokist horisontaalselt vasakule liikudes väljastusalale kõige lähemal (vt Joonis 8, tähistatud hüüumärgiga). Sellele liidetakse aeg, mis kulub A ploki läbimiseks.

Laoplaan plokipõhise modelleerimise tulemusena

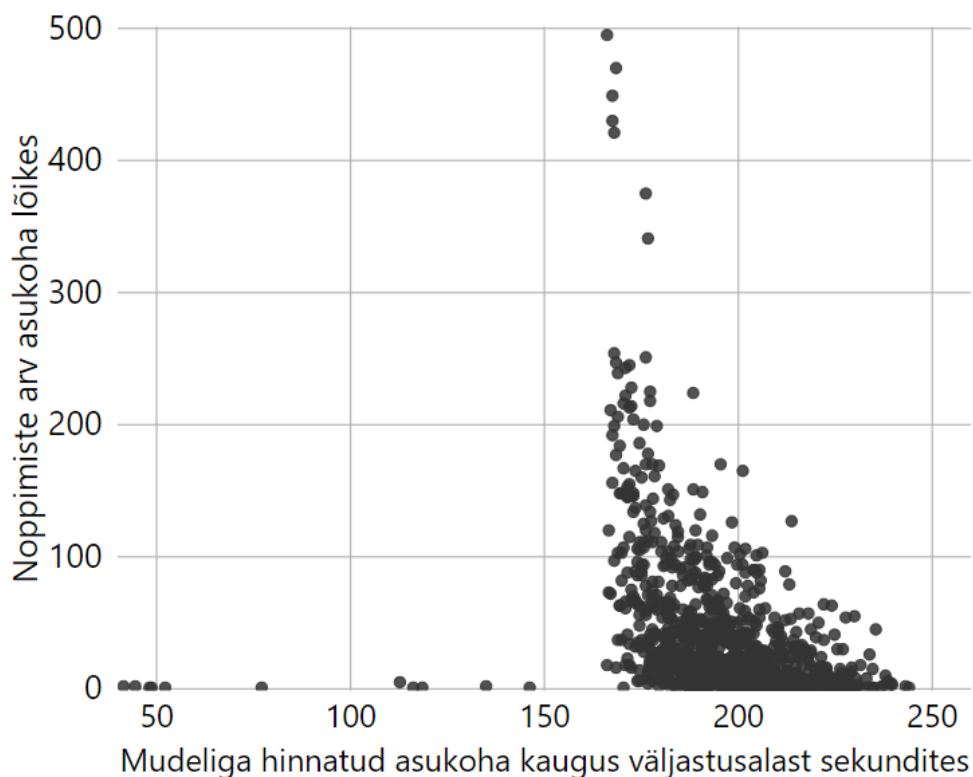
Mudeldamise tulemused interpreteeriti programmikoodiks ning visualiseeriti vastavalt (vt Lisa 4, Joonis 25). Joonisel on värvikoodid indikatsiooniks, kui kaua konkreetsest alast väljastusalani jõudmiseks kulub. Värvid on 60-sekundilise intervalliga. Kõige tumedam roheline märgib piirkonda, millest on võimalik jõuda väljastusalale vähem kui ühe minutiga ning kõige heledam toon vastavalt märgib asukohti, millest väljastusalani jõudmiseks kulub mudeli hinnangul rohkem kui neli minutit.

5 Kaupade analüüs ja mudeldamine

Konkreetses näites on vaatluse all 682 kaupa. Andmeid analüüsidest ilmneb, et 15% kaupadest on vaatlusperioodi jooksul nopitud ühel korral. 9% kaupadest on nopitud kahel korral. 3–10 korda on vaatlusperioodi jooksul nopitud 26% kaupadest. See tähendab, et vaadeldavate kaupade sortimendi lõikes 50% erinevatest kaupadest on vähe liikuvad. Ülejäänud 50% kaubaartiklitest on komplekteeritud rohkem kui kümnel korral. Samuti joonistub välja, et mõne üksiku kauba noppimised moodustavad suure osa kõikidest komplekteerimistest. Nimetatud tulemused annavad ainet detailsemaks analüüsiks.

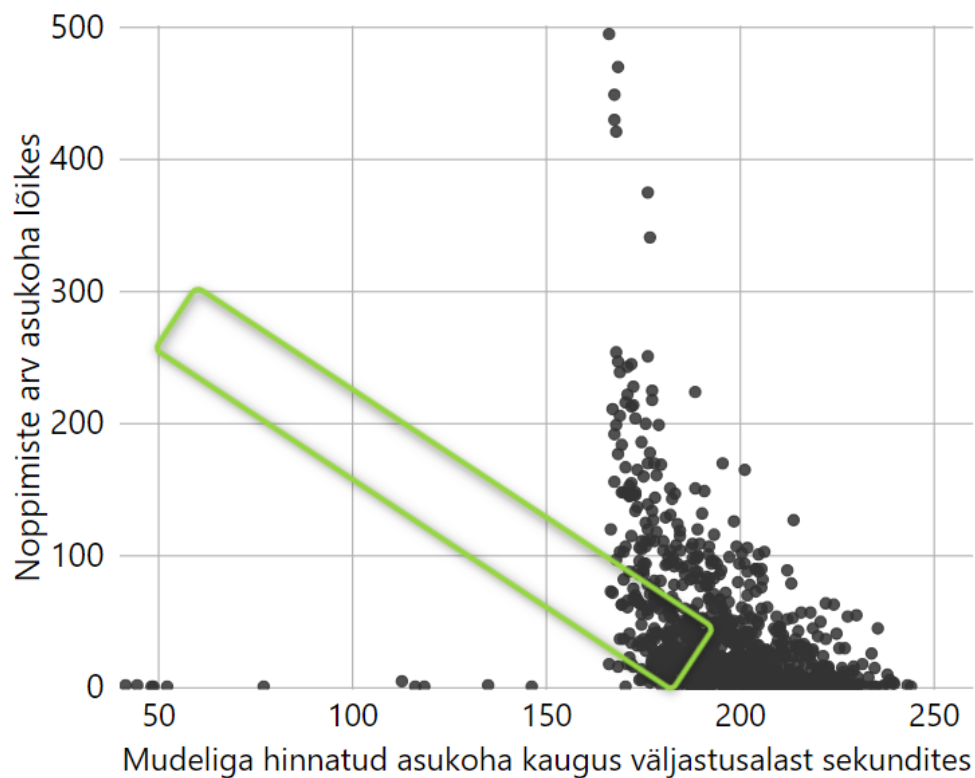
5.1.1 Üldpilt

Olles leidnud, kui kaua kulub aega lao asukohtadest väljastusalani jõudmiseks, saab leida, kui kaugelt (ajalises mõttes) ja tihti on seni kaupa noppimas käidud (vt Joonis 15). On näha, et võrdlemisi sageli nopitakse kaupa asukohtadest, mis paiknevad väljastusalast ajaliselt kaugemal. Samas hakkab kohe silma, et väljastusalale ajaliselt lähematest asukohtadest (kaugus 0-175 sekundit) on kaupa nopitud väga harva.



Joonis 15. Kauba noppimiste arv väljastusala kauguse lõikes. Tegelik olukord.

Esineb küll muster, et noppimiste arv ajalise kauguse kasvades kahaneb, kuid probleemseks võib pidada asjaolu, et väljastusalale lähemal asuvatest asukohtadest ei ole kaupa nopitud või on seda tehtud väga vähe. Ideaalne oleks olukord, kus esineb selge negatiivne korrelatsioon noppimiste arvu ja väljastusalale kauguse vahel. See tähendab, et noppimised erineva kaugusega asukohtadest võiksid parima olukorra puhul jaotuda ühtlaselt allpool oleval joonisel (vt Joonis 16) toodud roheline kasti sisse või selle lähedale. [11]



Joonis 16. Kauba noppimiste arv väljastusalale kauguse lõikes. Idealiseeritud olukord.

5.1.2 Prioriteetsete kaupade detailne analüüs

Nagu eelnevalt öeldud, siis konkreetsetes näiteettevõttes moodustavad suure osa noppimistest vähesed kaubad. Käesolevas töös nimetatakse neid prioriteetseteks kaupadeks. Tegemist on arvuliselt kuue kaubaga, mille noppimiste arv moodustab 20% kõikidest noppimistest. Nimetatud kaupad on vaatlusperioodi jooksul noppimas käidud mitmetest asukohtadest (vt Lisa 4, Joonis 26), kuid vaatlusperioodi viimase kolme kuu jooksul järgmistest asukohtadest (vt Lisa 4, Joonis 24). Iga kaup on tähistatud eraldi värviga (kokku 6 erinevat).

Esmalt kontrollitakse, kas konkreetsel kaubal on mõju liikumise kestusele. Seejärel hinnatakse, kas sesoonsusel on mõju kauba tellimissagedusele ning kontrollitakse sesoonsuse mõju kogusele. Iga kaupa analüüsitakse eraldi, kuna on alust arvata, et kaupade sesoonsused ei kattunud. Sesoonsuse hindamiseks analüüsitakse vastavate kaupade müügiinfo kolme aasta pikkust perioodi (täiendav andmetabel) – arvete hulka ja kauba kogust. Kõiki kolme omadust soovitakse hinnata, et anda soovitusi kauba potentsiaalse ümberpaigutamise osas.

Kauba mõju liikumise kestusele

Analüüsiti laoliikumisi, mis on seotud nimetatud 6 kõige prioriteetsema kaubaga ning tehtud B ploki sees (vt Joonis 7). Mudeli uuritavaks tunnuseks oli liikumise kestus ning argumenttunnusteks laoliikumise lähte- ja sihtpunkti asukohad ning kaubakood faktortunnusena. Kandidaatmudelitena testiti ka siin lognormaalse jaotusega, gammajaotusega ja Gaussi pöördjaotusega mudeleid. Kõige täpsemini sobitus andmetega lognormaalse jaotusega mudel. Mudeli parameetrite hinnangutest on näha, et kaupade 1 ja 6 noppimine põhjustab olulist liikumise kestuse pikenemist (vt Tabel 12).

Tabel 12. Kauba mõju laoliikumise kestusele. Lognormaalsel jaotusel baseeruv mudel.

Coefficients:		Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)		3.324471	0.054273	61.254	< 2e-16	***
WMSLocationID_TO_FLOOR		0.135469	0.021054	6.435	1.34e-10	***
fakeRowDiff_total		0.060255	0.002132	28.262	< 2e-16	***
aisleDiff		-0.048614	0.015479	-3.141	0.00169	**
as.factor(ITEMID_FROM)	Kaup 5	0.110609	0.060028	1.843	0.06544	.
as.factor(ITEMID_FROM)	Kaup 3	0.041017	0.054250	0.756	0.44964	
as.factor(ITEMID_FROM)	Kaup 2	-0.062842	0.052881	-1.188	0.23474	
as.factor(ITEMID_FROM)	Kaup 6	0.370252	0.066538	5.564	2.76e-08	***
as.factor(ITEMID_FROM)	Kaup 1	0.376570	0.052331	7.196	7.05e-13	***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Kaubad jagatakse parameetrite hinnangute järgi kiiremalt ja aeglasemalt liigutatavateks kaupadeks. Et Kauba 5 korral on kohe raske öelda, kas see on pigem kiiremas või aeglasemas klassis, siis määratakse Kaup 5 kord aeglasemasse ja kord kiiremasse gruppi. Mudelit sobitatakse mõlema grupeeringu korral ning vaadatakse, kumb annab parema tulemuse.

Võrreldes *AIC* väärtuseid, annab parema tulemuse mudel, milles on kaubad jaotatud vastavalt 1 ja 6 (aeglasemad kaubad) ning 2,3,4,5 (kiiremad kaubad). Seega võib öelda, et Kaup 5 sobitub paremini kiiremini liikuvate kaupade gruppi (2,3,4,5).

Kaup 1

Joonisel (vt Lisa 4, Joonis 24 ja Lisa 4, Joonis 26) on Kauba 1 noppimised tähistatud rohelise värviga. Nimetatud piirkondadest on konkreetset kaupa noppimas käidud viimasel kolmel kuul 948 korda. Selleks, et hinnata, kas sesoonsusel on mõju kauba väljastussagedusele või -kogusele, koostati vastavate uuritavate tunnuste analüüsiks üldistatud lineaarsed mudelid. Arvete väljastamise sageduse hindamiseks agregeeriti andmestik nädala detailsuse tasandile ning seejärel lisati kuu mudelisse faktortunnusena, mille baasiks on jaanuari kuu.

Kauba koguse modelleerimisel kuude lõikes kasutati kandidaatmudelitena lognormaalse jaotusega, gammajaotusega (pöörd-, log- ja identsusseosega) ja Gaussi pöördjaotusega (pöördruut-, identsus- ja log-seosega) mudeleid. Kõige paremini sobitus andmetega lognormaalse jaotusega mudel. Lognormaalne jaotus osutus ülekaalukalt parimaks ka ülejäänud viie prioriteetse kauba väljastuskoguse mudeldamisel. Nimetatud asjaolu kinnitasid nii *AIC* kui ka jääkide uurimine.

Allolevast lognormaalse jaotusega mudeli parameetrite hinnangu tabelist (vt Tabel 13) on näha, et kauba number 1 väljastuskogus ei sõltu kuust.

Tabel 13. Kauba 1 väljastuskoguse mudeldamine kuude lõikes. Lognormaalse jaotusega mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4.445376	0.041206	107.883	<2e-16 ***
as.factor(Month.Number)2	0.012147	0.057837	0.210	0.834
as.factor(Month.Number)3	-0.011344	0.056097	-0.202	0.840
as.factor(Month.Number)4	-0.001251	0.059893	-0.021	0.983
as.factor(Month.Number)5	0.067869	0.064074	1.059	0.290
as.factor(Month.Number)6	0.061913	0.064268	0.963	0.335
as.factor(Month.Number)7	0.048219	0.061941	0.778	0.436
as.factor(Month.Number)8	0.037600	0.082300	0.457	0.648
as.factor(Month.Number)9	-0.021883	0.066479	-0.329	0.742
as.factor(Month.Number)10	-0.076743	0.061294	-1.252	0.211
as.factor(Month.Number)11	0.024594	0.061518	0.400	0.689
as.factor(Month.Number)12	-0.120298	0.075455	-1.594	0.111

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Sarnaselt koguse analüüsile teostati ka arvete väljastamise sageduse analüüs. Lisaks eelnimetatud jaotustele võeti siin kasutusse ka normaal- ja Poissoni jaotused. Parimaks osutus normaaljaotusel baseeruv mudel, millest joonistus välja, et otsene sesoonsus puudub, kuid augustis väljastatakse arveid siiski vähem. Normaaljaotusega mudelid sobitusid kõige paremini ka ülejäänud viie kauba väljastussageduse andmetega.

Kaup 2

Kaup 2 noppimiste asukohad on joonisel (vt Lisa 4, Joonis 24) märgitud sinise värviga. Viimase kolme kuu jooksul on seda kaupa võtmas käidud 801 korda. Sesoonsuse mõju hindamisel kauba väljastuskogusele ja -sagedusele kasutati Kauba 2 ja järgmisena analüüsitavate 4 kauba puhul sarnast analüüsimetoodikat nagu Kauba 1 puhul. Kaupade väljastuskoguse modelleerimisel testiti gamma-, lognormaal- ja Gaussi pöördjaotusega mudeleid. Parima tulemuseni viis sarnaselt Kaubale 1 lognormaalse jaotusega mudel.

Kauba väljastuskoguse osas ei ilmnenud ühtegi kuud, mille tulemus oleks statistiliselt oluliselt teistest erinev. Seega võib öelda, et kauba väljastuskoguses sesoonsust ei esine. Analüüsides arvete väljastamise sagedust, siis Kaup 2 puhul on näha, et sagedus on väiksem augustis ja detsembris (vt Tabel 14).

Tabel 14. Kauba 2 arvete väljastamise sageduse normaaljaotust kasutava mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	33.538	3.925	8.545	6.23e-14	***
as.factor(Month.Number)2	-3.538	5.451	-0.649	0.51752	
as.factor(Month.Number)3	1.231	5.551	0.222	0.82492	
as.factor(Month.Number)4	-5.824	5.451	-1.069	0.28752	
as.factor(Month.Number)5	-6.938	5.952	-1.166	0.24617	
as.factor(Month.Number)6	-2.650	6.137	-0.432	0.66672	
as.factor(Month.Number)7	-5.838	5.952	-0.981	0.32873	
as.factor(Month.Number)8	-19.163	6.359	-3.014	0.00318	**
as.factor(Month.Number)9	-7.650	6.137	-1.247	0.21509	
as.factor(Month.Number)10	-2.838	5.952	-0.477	0.63437	
as.factor(Month.Number)11	1.087	6.359	0.171	0.86463	
as.factor(Month.Number)12	-13.094	6.137	-2.134	0.03499	*

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Nagu eelnevalt vaadeldud (vt Tabel 12), siis Kauba 2 noppimine liikumise kestuse mudeldamisel oluliseks tunnuseks ei osutunud.

Kaup 3

Kaup 3 on viimase kolme kuu jooksul noppimas käidud asukohtadest, mis laoplaanil on märgitud violetse värviga (vt Lisa 4, Joonis 24). Arvuliselt on selle kauba noppimisi nimetatud perioodi vältel olnud 742.

Analüüsides, kas väljastatav kauba kogus on mõjutatud mõnest konkreetsest kuust, selgub, et põhjust sellise hinnangu andmiseks ei ole. Andes hinnangut arvete väljastamise sagedusele, ilmneb ka Kaup 3 puhul, et augustis on sagedus märksa väiksem (vt Tabel 15). Hinnates kaupade mõju laoliikumise kestusele, selgub, et vaadeldaval kaubal ei ole statistiliselt olulist mõju laoliikumise kestusele (vt Tabel 12).

Tabel 15. Kauba 3 arvete väljastamise sageduse normaaljaotusel baseeruva mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	32.077	3.727	8.607	4.49e-14 ***
as.factor(Month. Number)2	-5.648	5.176	-1.091	0.27741
as.factor(Month. Number)3	-3.005	5.176	-0.581	0.56258
as.factor(Month. Number)4	-5.220	5.176	-1.009	0.31532
as.factor(Month. Number)5	-8.677	5.652	-1.535	0.12749
as.factor(Month. Number)6	-7.977	5.652	-1.411	0.16085
as.factor(Month. Number)7	-3.777	5.652	-0.668	0.50533
as.factor(Month. Number)8	-18.952	6.038	-3.139	0.00216 **
as.factor(Month. Number)9	-4.077	6.038	-0.675	0.50092
as.factor(Month. Number)10	-2.277	5.652	-0.403	0.68781
as.factor(Month. Number)11	1.798	6.038	0.298	0.76641
as.factor(Month. Number)12	-9.827	6.038	-1.627	0.10638

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				

Kaup 4

Kauba 4 noppimiste asukohad viimase kolme kuu jooksul on märgitud joonisele (vt Lisa 4, Joonis 24) kollase värviga. Nimetatud kaupa on sel perioodil võtnud käidud 404 korda. Hinnates, kas mõnel kuul on mõju Kauba 4 müügikogusele, ilmneb, et statistiliselt ei ole põhjust seda arvata. (vt Tabel 16).

Tabel 16. Kuu mõju Kauba 4 müügikogusele. Lognormaalse jaotusega mudeli parameetrite hinnangud.

Coefficients:				
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4.148942	0.065744	63.108	<2e-16 ***
as.factor(Month. Number)2	0.008826	0.087791	0.101	0.920
as.factor(Month. Number)3	0.125552	0.082402	1.524	0.128
as.factor(Month. Number)4	-0.056442	0.084716	-0.666	0.505
as.factor(Month. Number)5	0.005275	0.092715	0.057	0.955
as.factor(Month. Number)6	0.073539	0.092335	0.796	0.426
as.factor(Month. Number)7	0.050508	0.093649	0.539	0.590
as.factor(Month. Number)8	-0.101049	0.112418	-0.899	0.369
as.factor(Month. Number)9	0.048377	0.093511	0.517	0.605
as.factor(Month. Number)10	-0.116572	0.088960	-1.310	0.190
as.factor(Month. Number)11	-0.108163	0.092715	-1.167	0.243
as.factor(Month. Number)12	-0.003611	0.103429	-0.035	0.972

signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				

Andes hinnangut, kuivõrd mõjutab Kauba 4 arvete väljastamise sagedust konkreetne kuu, ilmneb, et sagedus on suurem märtsis. Teiste kuude puhul statistiliselt olulist erinevust ei esine. Samuti ei mõjuta vaadeldav kaup laoliikumise kestust (vt Tabel 12).

Kaup 5

Kaup number 5 on joonisel (vt Lisa 4, Joonis 24) märgitud punase värviga. Noppimisi on arvuliselt tehtud 429. Sarnaselt eelmainitud kaupadele, selgus ka Kauba 5 modelleerimisel, et kuude lõikes kaupade väljastuskogus statistiliselt ei erine. Arvete väljastamise sageduse osas ilmnes sarnaselt kaupadele number 1,2 ja 3, et augustis on sagedus oluliselt väiksem (vt Tabel 17).

Tabel 17. Kaup 5 väljastamise sageduse modelleerimine. Normaalkaotusel baseeruv mudel.

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	23.9231	3.1764	7.531	1.44e-11	***
as.factor(Month.Number)2	0.4103	4.5848	0.089	0.9289	
as.factor(Month.Number)3	2.5385	4.4921	0.565	0.5732	
as.factor(Month.Number)4	-3.7088	4.4112	-0.841	0.4023	
as.factor(Month.Number)5	-3.2231	4.8173	-0.669	0.5048	
as.factor(Month.Number)6	2.0769	5.1464	0.404	0.6873	
as.factor(Month.Number)7	-3.4231	4.8173	-0.711	0.4788	
as.factor(Month.Number)8	-11.9231	5.1464	-2.317	0.0224	*
as.factor(Month.Number)9	-2.4786	4.9662	-0.499	0.6187	
as.factor(Month.Number)10	-1.0231	4.8173	-0.212	0.8322	
as.factor(Month.Number)11	1.2019	5.1464	0.234	0.8158	
as.factor(Month.Number)12	-6.6731	5.1464	-1.297	0.1974	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Ilmnes ka, et liikumise kestus ei ole mõjutatud asjaolust, et nopiti just seda kaupa.

Kaup 6

Kauba number 6 noppimisasukohad viimasel kolmel kuul on joonisel (vt Lisa 4, Joonis 24) tähistatud halliga. Seda kaupa on nopitud nimetatud perioodil 343 korda. Sarnaselt mitmele eelpool kirjeldatud kaubale, on ka kauba number 6 arvete väljastamise sagedus augustis ja detsembris oluliselt väiksem. Kauba müügi koguse poolest ei erine mitte ükski kuu teistest oluliselt. Küll aga on Kaup 6 oluliseks mõjutajaks laoliikumise kestuse hindamisel. Lähtuvalt mudelist pikeneb liikumise kestus oluliselt, kui liikumisega on seotud kauba number 6 noppimine (vt Tabel 12).

5.1.3 Prioriteetsete kaupade detailanalüüsi järeldused

Mitmete kaupade puhul ilmnes, et arveid väljastatakse vähem augusti ja detsembri kuus. Kuna nimetatud tunnuse olulisus ilmnes mitme kauba puhul, siis ei saa seda asjaolu võtta kui sisendit kaupade sesoonseks ümberpaigutamiseks. Samuti ei esinenud konstrueeritud

modelite põhjal hinnates sesoonsuse tunnuseid ka kauba müügi koguses. Detailanalüüsi huvitavateks tulemusteks võib pidada asjaolu, kui liikumine on seotud kaubaga 1 või 6, on liikumise kestus pikem.

Saadud tulemustest võib järeldada, et otsest vajadust vaadeldavate 20% noppimistest moodustavate kaupade ümberpaigutamiseks ei ole. Tulenevalt asjaolust, et kaupade 1 ja 6 liigutamine on ajakulukam, võiks need paigutada väljastusalale ajaliselt võimalikult lähedale.

6 Laopaigutuse ja kaupade asukohtade koostõlastamine

Nagu varasemalt öeldud, on oluline paigutada sagedasti nopitavad kaubad kõige lihtsamini ligipääsetavatesse riiulitesse ning vähenopitavad kaubad peaksid asetsema kaugemates asukohtades. Konkreetsetes näites on vaatluse all 682 kaupa ning 1756 ladustamiseks kasutatavat asukohta.

6.1.1 Asukohtade ja kaupade jagamine ABC klassidesse

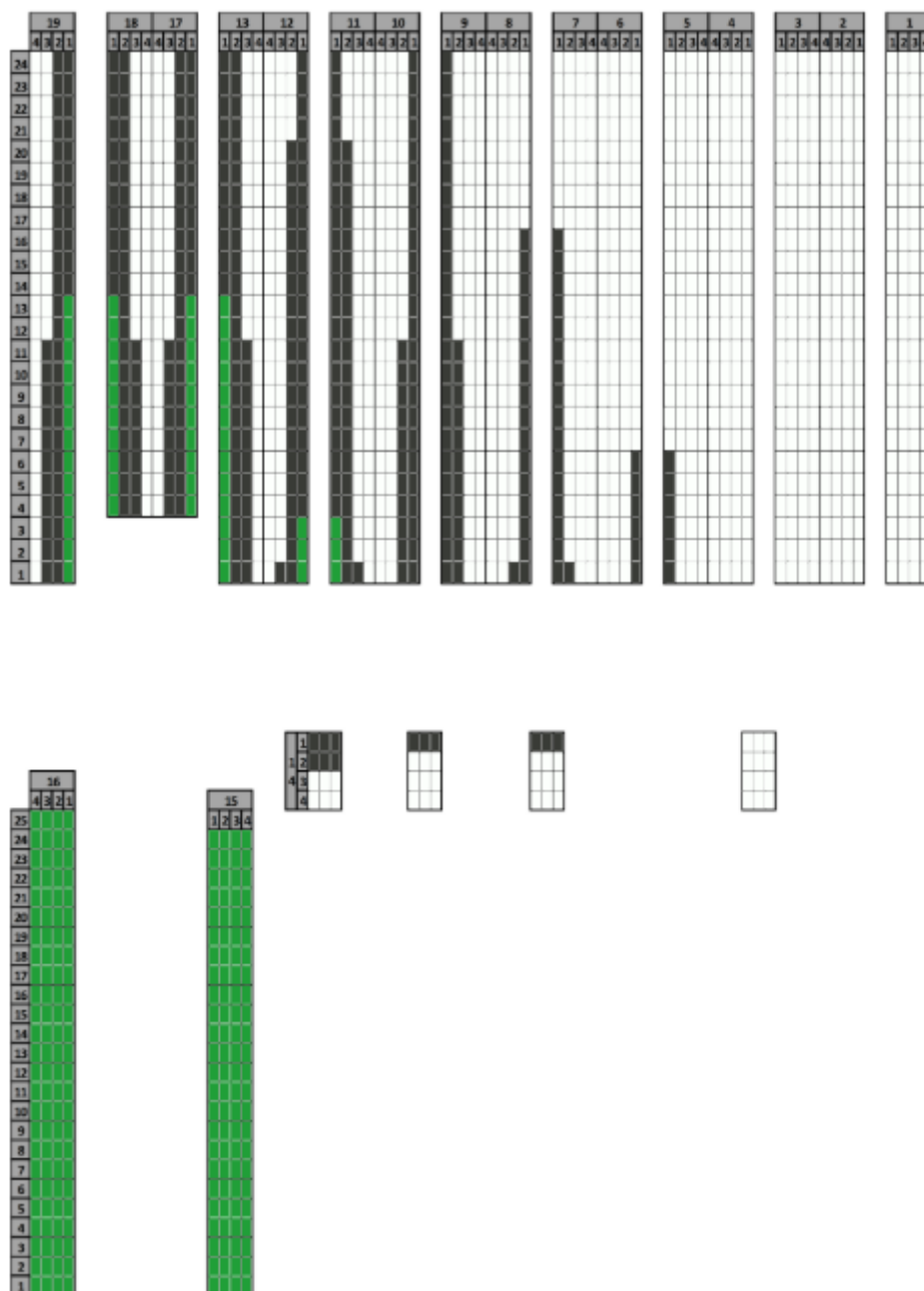
Lihtne viis lao tsoonideks jagamiseks on jaotada esmalt kaubad prioriteetsuse järgi kolme klassi (A, B, C) [11]. A klassi kaubad moodustavad 60%, B klassi kaubad 30% ning C klassi kaubad vastavalt 10% kõikidest noppimistest. Eeldusel et kõikidele kaupadele on laos võrdselt ruumi, jagatakse ladu samuti kolmeks. Iga tsooni suurust mõjutab kaubaartiklite arv ühes klassis. Nii on laos tekitatud prioriteetsuse tsoonid vastavuses kaubaklasside suurustega.

Oluliselt täpsema tulemuse võiks saada, kui kaasata lahendusse laoseisud ning iga asukoha täidetuse tasemed. Nimetatud idee võiks olla käesoleva töö üheks edasiarenduseks.

Uuritavas näitelao:

- 60% noppimisestest on seotud 7%-ga kaupadest (48 kaubakoodi)
- 30% noppimisestest on seotud 21%-ga kaupadest (143 kaubakoodi)
- 10% noppimisestest on seotud 72%-ga kaupadest (491 kaubakoodi)

Vastavalt eespool toodud kaupade klassifitseerimisele ja sellega seonduvale lao asukohtadele prioriteetide seadmisele jõuti alljärgneva tulemuseni (vt Joonis 17). Roheline piirkond tähistab eelistatult A klassi kaupadele reserveeritud laoasukohti, hall ja valge tähistavad vastavalt B ja C klassi kaupade parimaid paigutuskohi.



Joonis 17. Laopiirkondade ABC tsoonid.

6.1.2 Loodud rakenduse tutvustus ja tulemuste kirjeldus

Analüüsi tulemusena on igale kaubale määratud optimaalse asukoha tunnus. Sellest tulenevalt loodi analüüsirakendus, milles kasutaja saab lihtsasti leida kaubad, mida on mitteoptimaalsetes asukohtades hoitud (lähtuvalt komplekteerimise andmetest) (vt Lisa 4, Joonis 27). Samuti saab iga lattu saabuva kauba puhul vaadata, mis oleks selle potentsiaalselt parim ladustamispiirkond.

Loodud lahendusest on näha, et on palju kaupasid, mida on noppimas käidud mitteoptimaalsetest asukohtadest. A klassi kaupasid on vaatlusperioodil kokku 48, ning neid on nopitud 24197 korda. Kõikisid A klassi kaupasid on nopitud ka B ja C klassi kaupadele sobilikest piirkondadest. Seda on tehtud 16992 korral, mis moodustab 70% kõikidest A klassi kaupade noppimisest. Kui vaadelda kõiki kaubaklasse ja tsoone, siis kõikidest kaupade noppimistest (40136) 61% on tehtud mitteoptimaalsetest piirkondadest.

Hinnang, milline oleks potentsiaalne ajaline võit, kui kaubad oleksid paigutatud vaatlusperioodi algusest alates optimaalsetesse asukohtadesse, saadakse järgmiselt:

- 1) Arvutatakse reaalselt tehtud noppimiste „tehislikud“ kestused.
- 2) Arvutatakse, millised oluks reaalselt tehtud noppimiste „tehislikud“ kestused, kui konkreetset kaupa oleks nopitud sellele määratud optimaalsest tsoonist.
- 3) Võrreldakse kahte eelnimetatud tulemust.

„Tehislik“ antud kontekstis tähendab, et kui tegelikult komplekteerimistöö täitmisel pärast ühe kauba noppimist liigutakse tihtipeale järgmisesse asukohta järgmist kaupa noppima, siis antud juhul tekitatakse tehislikult olukord, kus pärast iga kauba noppimist oleks justkui liigutud väljastusalale. Selline lihtsustamine on vajalik, kuna töös ei ole realiseeritud liikumiste kestust kõikide asukohtade vahel ning seega vastavad hinnangud puuduvad. Iga asukoha kaugus väljastusalast on leitud kasutades käesolevas töös koostatud mudeleid.

A tsooni laoasukoha keskmine kaugus väljastusalast on 98, B tsoonil 183 ning C tsoonil 214 sekundit. Kui kõik A klassi kaubad oleksid olnud paigutatud A tsooni ning pärast iga noppimist oleks liigutud väljastusalale, oleks selleks keskmiselt kulunud noppimiste arv \times keskmine kaugus väljastusalast $= 24197 \times 98 = 2371306$ sekundit (1647 päeva). Kuna aga reaalselt on A klassi kaupu nopitud ka B tsoonist (11897 korda) ja C tsoonist (5095 korda), siis kulunuks nendele liikumistele $98 \times 7205 + 183 \times 11897 + 5095 \times 214 = 3973571$ sekundit (2759 päeva). See tähendab, et kui A klassi kaubad oleksid kõik algusest peale paigutatud A tsooni, oleks hinnanguline ajavõit olnud 40%.

B klassi kaupsid oli 142 ning neid nopiti 11910 korda, millest 6076 korda B, 5099 korda C ja 735 korda A tsoonist. Rakendades ka siin eelnevalt toodud suhtelise ajavõidu loogikat, saab B klassi kaupade puhul vastavaks potentsiaalseks ajavõiduks 4%.

Kõige väiksema noppimissagedusega ehk C klassi kaupsid on komplekteeritud 4029 korral. Neist C tsoonist 2266 korda, B tsoonist 1551 korda ja A tsoonist 212 korda. Rakendades ka siin eelnevates lõikudes juba rakendatud ajalise võidu hinnangu loogikat, siis nagu C klassi kaupade puhul oodata oli – ajalist võitu ei esine (kuna C klassi kaupsid on reaalsuses nopitud ka kiirematest tsoonidest kui C). Ajaline kaotus C klassi kaupade lõikes oleks 8%.

Kui aga vaadata kõiki noppimisi terviklikult, siis klassipõhise kaupade ladustamise tulemusena oleks hinnanguline ajavõit võrreldes senise olukorraga 23%.

7 Kokkuvõte

Tarneahelas on laotegevustel ja nendega seotud kuludel suur roll. Tootmisettevõtete jaoks võib lao läbilaskevõime osutuda kriitilise tähtsusega teguriks. Seega on oluline, et ladu oleks väga hästi juhitud. Viies laopaigutuse optimaalsele tasemele, võib see avada võimaluse riiulite arvu või koguni laopinna vähendamiseks. Samuti leiavad laoseadmed vähem rakendust, sellest tulenevalt pikeneb nende hooldusintervall või esineb masinaid, mis ei osutu enam vajalikuks. Kui komplekteerimisele kulub varasemast vähem aega ja ressursi, võib muuhulgas väheneda tööjõuvajadus.

Käesolevas töös analüüsiti konkreetse tootmisettevõtte laosiseseid liikumisi, et hinnata, milline on laopaigutuse hetkeolukord ning mis oleks iga kauba parim ladustamispiirkond. Analüüs teostati üldistatud lineaarsete mudelite abil. Uuritavaks tunnuseks oli liikumiste kestus. Kuna nimetatud tunnuse juhuslik suurus oli pidev ja mittenegatiivne, siis mudelite koostamisel kasutati vastavate omadustega jaotusi – lognormaaljaotust, gammajaotust ja Gaussi pöördjaotust.

Laoplaani alusel jaotati ladu tinglikult kolmeks asukohtade plokiks (piirkonnaks), ning iga ploki liikumiste kestuste hindamiseks koostati eraldi mudel. Sellise jaotamise põhjustas plokkide füüsiliselt erinev paigutus. Mudelite alusel anti hinnang igaile lao asukohale - kui palju kulub aega sellest väljastusalani jõudmiseks.

Lisaks analüüsiti kaupsid, mida vaatlusperioodi jooksul on komplekteeritud. Kaubad jaotati noppimissageduse alusel klassidesse. Kõige sagedamini nopitud kaupade liikumiste paremaks mõistmiseks viidi läbi täiendav kaubapõhine detailanalüüs. Selgus, et sesoonseks kaupade ümberpaigutamiseks ei ole põhjust. Konkreetsest valimist kahe kauba puhul selgus, et nende noppimine põhjustab liikumise kestuse pikenemist.

Kaupade klassid ja laoasukohtade tsoonid viidi vastavusse ning igaile kaubale omistati parima ladustamispiirkonna tunnus. Lõppkasutajale loodi töö käigus vastav interaktiivne analüüsi töölaud. Kasutades loodud lahendust, selgus, et 61% kõikidest vaatlusperioodi vältel tehtud noppimistest on teostatud mitteoptimaalsetest piirkondadest. Kui kaubad oleksid alates vaatlusperioodi algusest lattu paigutatud neile sobivatesse tsoonidesse, oleks saavutatud hinnanguline ajavõit suurusjärgus 23%.

Kasutatud kirjandus

- [1] J. J. Bartholdi ja S. T. Hackman, Warehouse & Distribution Science, Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2017.
- [2] A. Fumi, L. Scarabotti ja M. M. Schiraldi, The Effect of Slot-Code Optimization in Warehouse Order Picking, *International Journal of Engineering Business Management*, kd. 5, 2013.
- [3] N. Zaerpour, Efficient Management of Compact Storage Systems, Erasmus Research Institute of Management – ERIM, Rotterdam, 2013.
- [4] F. Viidul, Dynamics AX 4.0 data model overview, Microsoft Corporation, 2008.
- [5] The R Foundation, What is R?, [Võrgumaterjal]. <https://www.r-project.org/about.html>. [Kasutatud 25 04 2019].
- [6] Microsoft Corporation, Data Analysis Expressions (DAX) Reference, [Võrgumaterjal]. <https://docs.microsoft.com/en-us/dax/data-analysis-expressions-dax-reference>. [Kasutatud 25 04 2019].
- [7] Microsoft, What is Power BI?, Microsoft, [Võrgumaterjal]. <https://powerbi.microsoft.com/en-us/what-is-power-bi/>. [Kasutatud 14 05 2019].
- [8] G. Tutz, Regression for Categorical Data, Cambridge Books Online, 2012.
- [9] D. C. Hoaglin ja R. E. Welsch, The Hat Matrix in Regression and ANOVA, *The American Statistician*, kd. 32, lk. 17-22, 1978.
- [10] J. Fox ja S. Weisberg, An R Companion to Applied Regression. Third edition, California: SAGE Publications, Inc., 2019.
- [11] C. Battista, A. Fumi, F. Giordano ja M. Schiraldi, Storage Location Assignment Problem: implementation in a warehouse design optimization tool, *Breaking down the barriers between research and industry*, Padua, 2011.

Lisa 1 – Laoplaani selgitus

Alljärgnevalt kirjeldatakse laoplaani ning töös kasutatud termineid lähemalt. Joonisel (vt Joonis 18) punasega märgitud numbrid 1-19 tähistavad riiulite plokkide (käesolevas töös nimetatud veergudeks). Rohelisega märgitud numbrid 1-4 tähistavad riiulite korruseid ning tumesinised numbrid 1-25 tähistavad riiuleid (käesolevas töös nimetatud reaks). Asukohtade numeratsioon on defineeritud infosüsteemis enne käesoleva analüüsi teostamist.

Igas riiulite blokkis on maksimaalselt 25 riiulit ning 4 korrust. Iga riiulite plokk on ligipääsetav ühest vahekäigust. Riiuliplokkide 1-13 ja 17-19 vahekäikudesse on võimalik siseneda ainult ühelt poolt – reanumbrite algusest (vt Joonis 18), teises otsas on sein.

Teistest veergudest erinevalt on paigutatud veerg number 14. Laoplaanilt vaadates on näha, et kui teiste veergude riiulinumbrid jooksevad vertikaalselt alt üles, siis veerg number 14 puhul horisontaalselt paremalt vasakule. Laoplaani mõistes erineb ka korruste tähistus teistest veergudest – korrused on märgitud vertikaalselt kasvavalt ülevalt alla.

Alloleval joonisel on helesinisega toodud ühe komplekteerimistöö näitetrajektor (vt Joonis 18). Komplekteerimistööd alustatakse esimese kauba noppimisega punktist A (veerg 2, riiul 14, korrus 3). Järgmist kaupa minnakse võtma asukohast B (veerg 9, riiul 24, korrus 2). Seejärel võetakse kaup C asukohast (veerg 11, riiul 1, korrus 2). Seejärel liigutakse kolmest kohast nopitud kaupadega väljastusalale.

Käesolevas töös on uuritavaks tunnuseks liikumise kestus erinevate noppimispunktide vahel. Argumenttunnusteks on lähtepunkti riiuliploki number, riiuli number, korruse number; sihtpunkti riiuliploki number, riiuli number, korruse number; sihtpunkti ja lähtepunkti plokinumbrite vahe absoluutväärtus, riiulite arv, millest liikumisel mööduti; korruste vahe absoluutväärtus.

Joonisel oleva näite puhul (vt Joonis 18) liikumisel punktist A punkti B:

- Uuritav tunnus: liikumise kestus
- Argumenttunnuste väärtusteks:
 - A punkti riiuliploki number: 2
 - A punkti riiuli number: 14
 - A punkti korruse number: 3
 - B punkti riiuliploki number: 9
 - B punkti riiuli number: 24
 - B punkti korruse number: 2
 - Plokinumbrite vahe absoluutväärtus: $|2 - 9| = 7$
 - Riiulite arv, millest liikumisel mööduti: $14 + 24 = 38$
 - Korruste vahe absoluutväärtus: $|3 - 2| = 1$

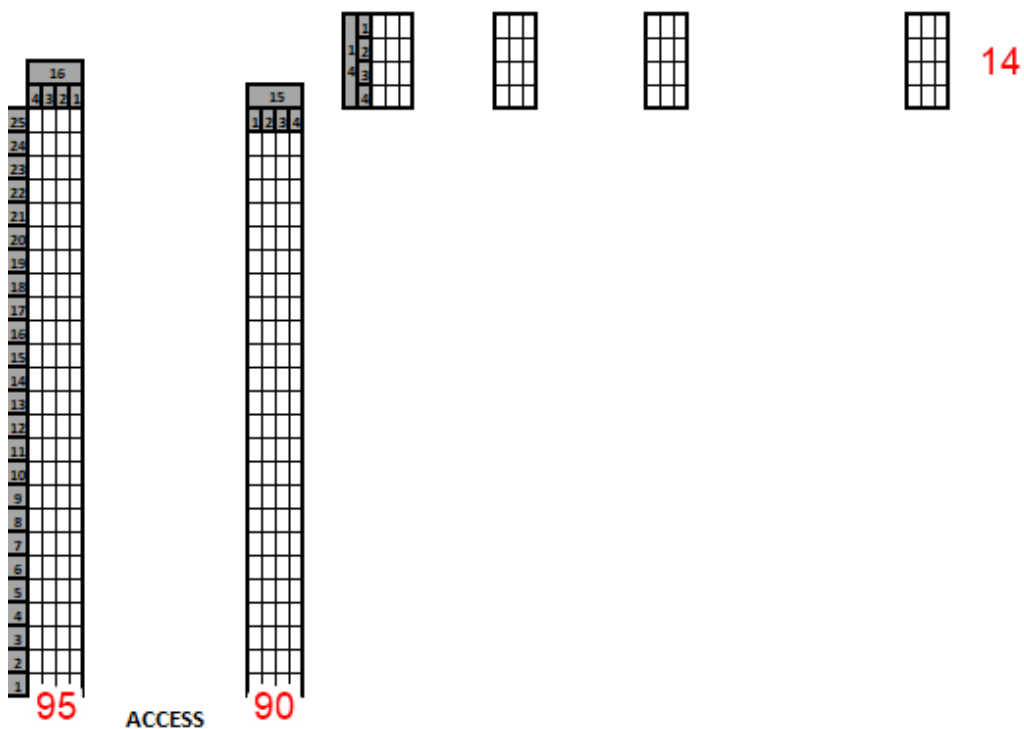
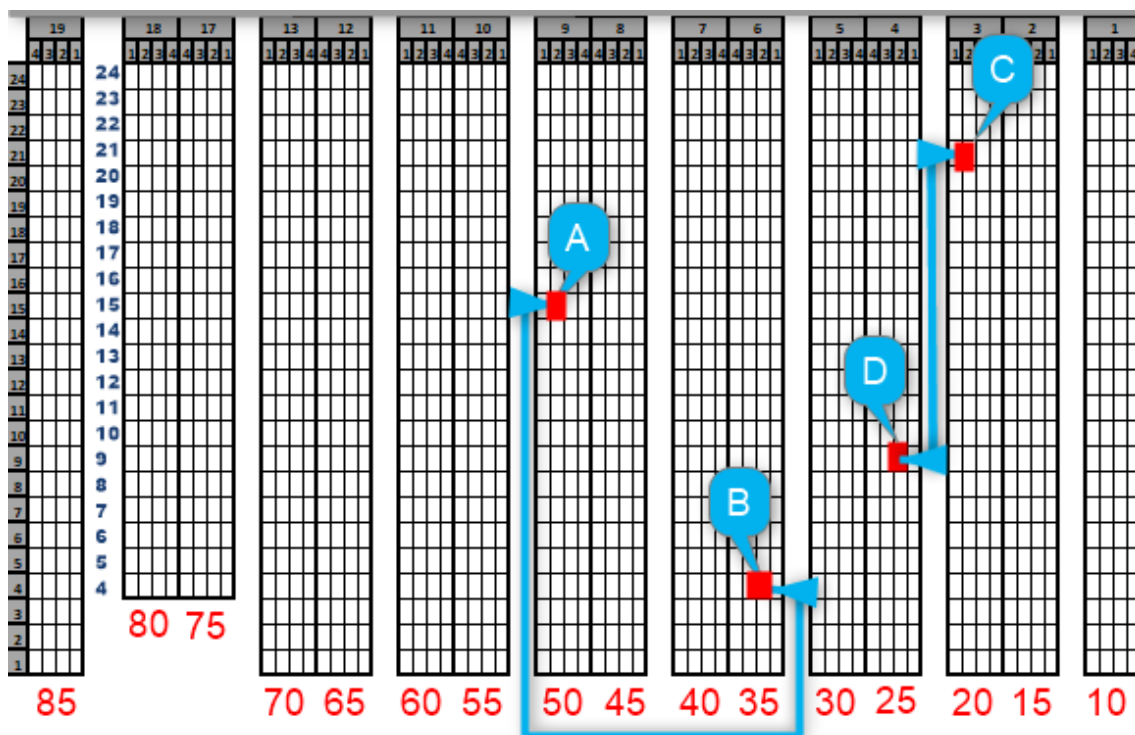
Lisa 2 – Laoplaan täiendavate tunnustega

Kirjeldamaks paremini aega, mis kulub laoasukohtadest väljastusalani jõudmiseks, lisati andmetesse täiendavaid tunnuseid: veerunumbreid muutev tunnus, reanumbreid muutev tunnus ja tunnus, mis näitab ridade arvu, millest liikumisel punktist A punkti B mööduti.

Veerunumbreid muutev tunnus *fakeColumnNumber_FROM* tähistab lähtepunkti veerunumbrit, *fakeColumnNumber_TO* tähistab sihtpunkti veerunumbrit. Uued veerunumbrid on määratud nii, et ühest vahekäigust ligipääsetavad veerud algavad sama numbriga (vt Joonis 19). Näiteks kui infosüsteemi poolt defineerituna olid samast vahekäigust ligipääsetavad veerud numbritena 9 ja 10, siis käesolevas töös käsitletakse neid vastavalt numbritena 50 ja 55. Tunnus *fakeColumnDiff* tähistab vastavalt *fakeColumnNumber_FROM* ja *fakeColumnNumber_TO* numbrilise vahe absoluutväärtust.

Reanumbreid muutev tunnus *fakeRowNumber_FROM* tähistab lähtepunkti riuli numbrit ning *fakeRowNumber_TO* vastavalt sihtpunkti riuli numbrit. Vajadus nimetatud tunnuste lisamiseks tekkis B ploki liikumiste modelleerimisel. Nimelt on laoplaanilt (vt Joonis 19) näha, et veergudel, mille uued numbrid on 75 ja 80, esimesed riulid on teiste sama ploki veergude neljanda riuli kaugusel. Nimetatud tunnuse lisamisega eemaldati see anomaalia ning veergude 75 ja 80 ridade numeratsioon algab nüüd numbriga 4 (vt Joonis 19, tumesinisega märgitud vertikaalsed numbrid 4-24). Tunnus *fakeRowDiff* tähistab tunnuste *fakeRowNumber_FROM* ja *fakeRowNumber_TO* numbrilise vahe absoluutväärtust.

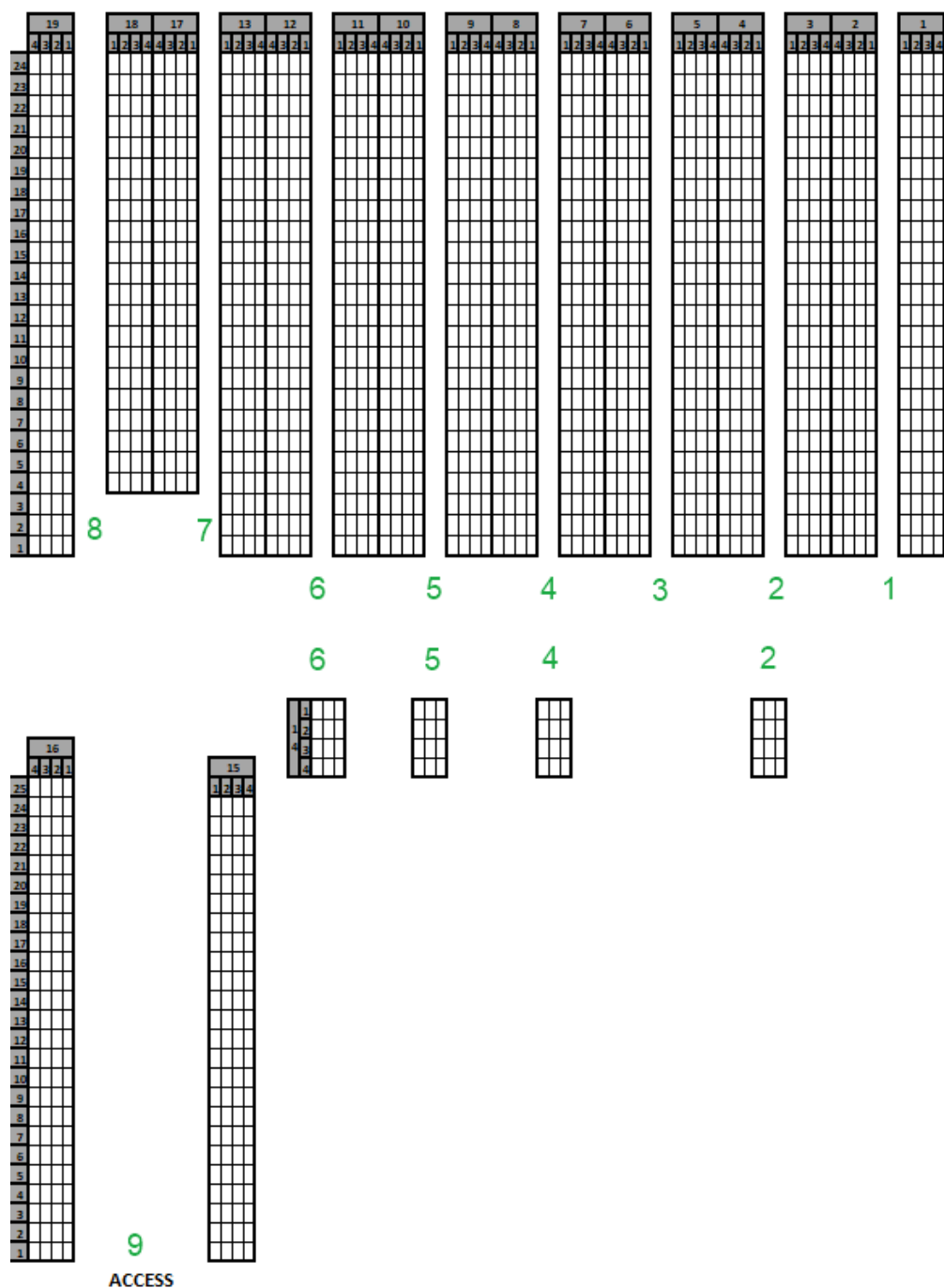
Tunnus *fakeRowDiff_total* annab infot ridade arvu kohta, millest mööduti, kui liiguti lähtepunktist sihtpunkti. Kui liikumine toimus ühe vahekäigu piires, siis on *fakeRowDiff_total* võrdne tunnuse *fakeRowDiff* väärtusega ehk sisuliselt kahe reanumbri erinevusega (vt Joonis 19, liikumine punktist D punkti C või vastupidi). Erinevus tuleb sisse, kui lähte ja sihtpunkt asuvad erinevates vahekäikudes (vt Joonis 19, liikumine punktist A punkti B või vastupidi). Kuna B ploki (vt Joonis 7) vahekäikudesse on võimalik siseneda ainult ühelt poolt (veerud piirnevad suuremate reanumbrite poolt seinaga), siis viimasel juhul ei võrdu liikumisel möödutud riulite arv riulinumbrite vahe absoluutväärtusega vaid lähtepunkti riulinumbri ja sihtpunkti riulinumbri summaga (vt Joonis 19, liikumine punktist A punkti B või vastupidi).



Joonis 19. Täiendavad asukoha numeratsiooni tunnused.

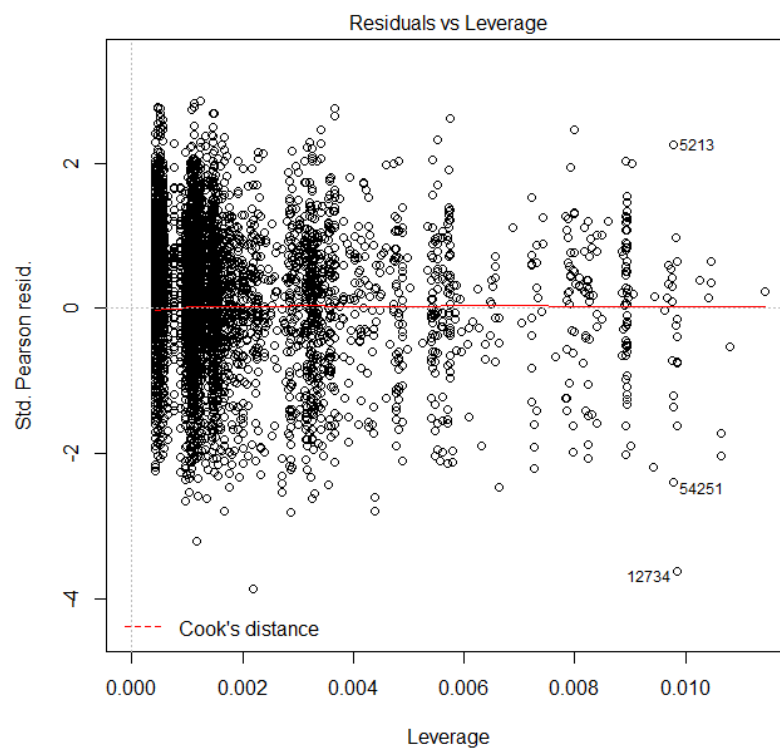
Lisa 3 – Vahekäigu tunnus

Andmetele lisati täiendavad tunnused vahekäikude nummerdamiseks (vt Joonis 20). Lisati lähtepunkti vahekäigu tunnus, (*aisle_TO_correct*) sihtpunkti vahekäigu tunnus (*aisle_TO_correct*) ning nende vahe (*aisleDiff*). Vastavad tunnused määrati ka 14nda veeru riulitele.

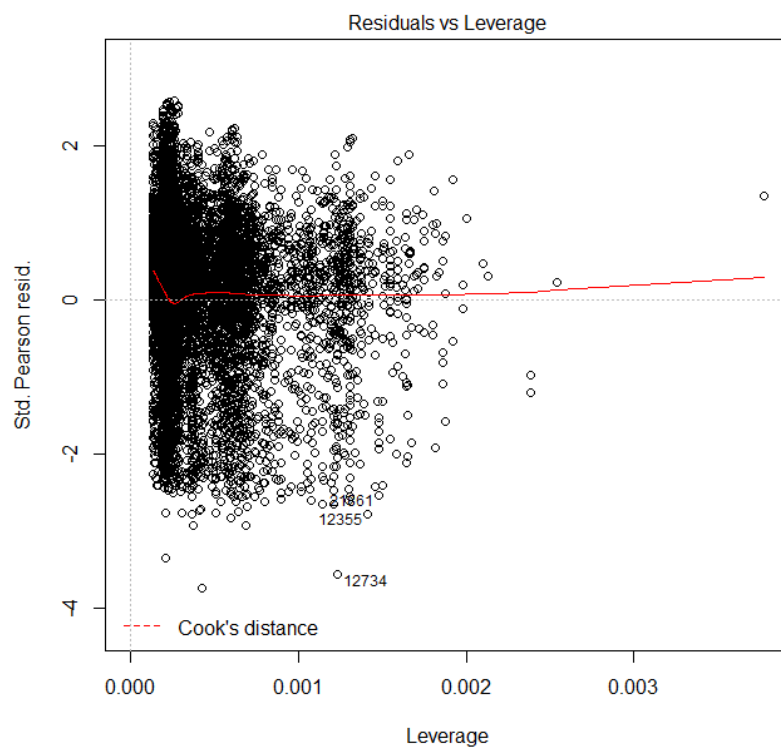


Joonis 20. Täiendavalt lisatud vahekäikude nummerdus.

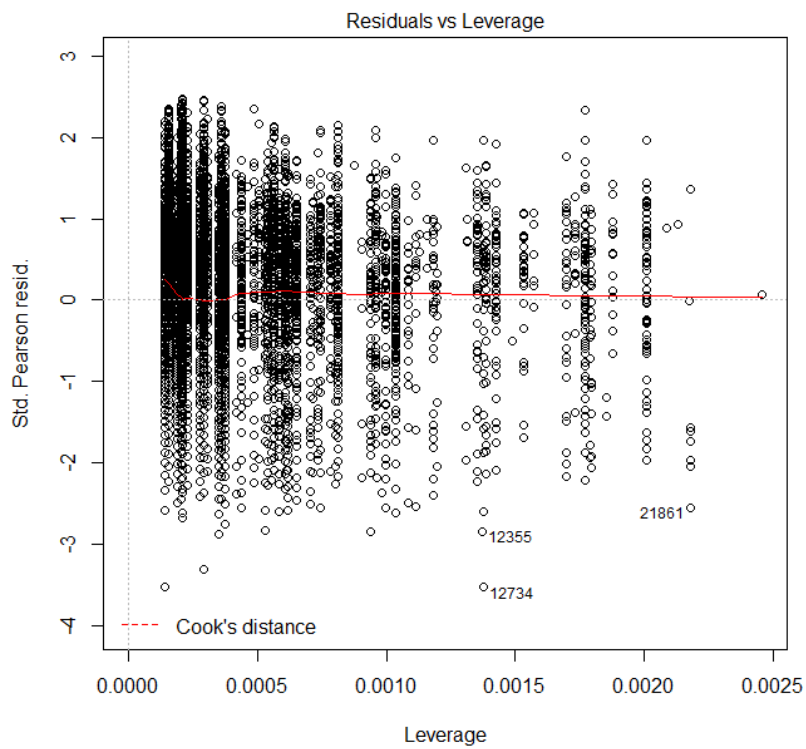
Lisa 4 – Täiendavad joonised ja tabelid



Joonis 21. A ploki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid ja Cook'i kaugus.

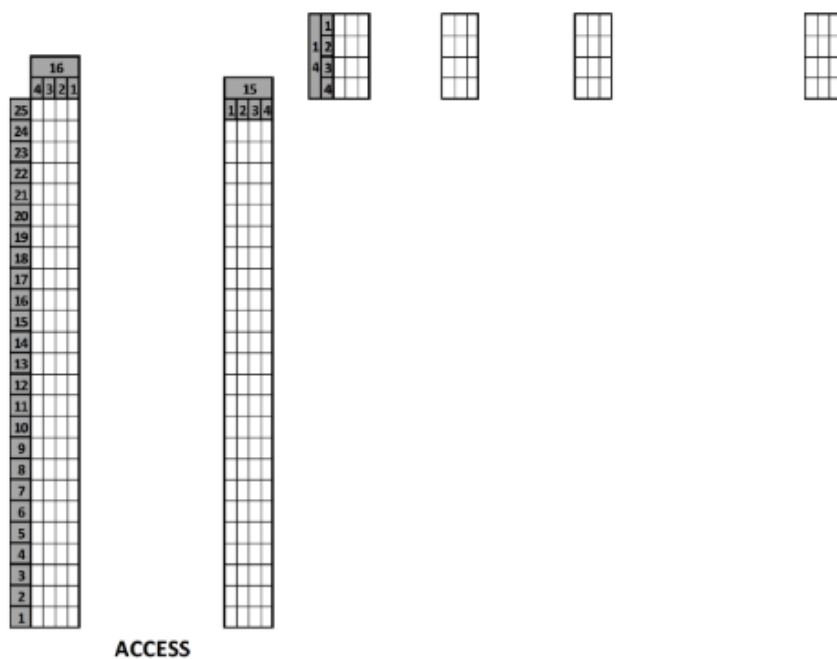
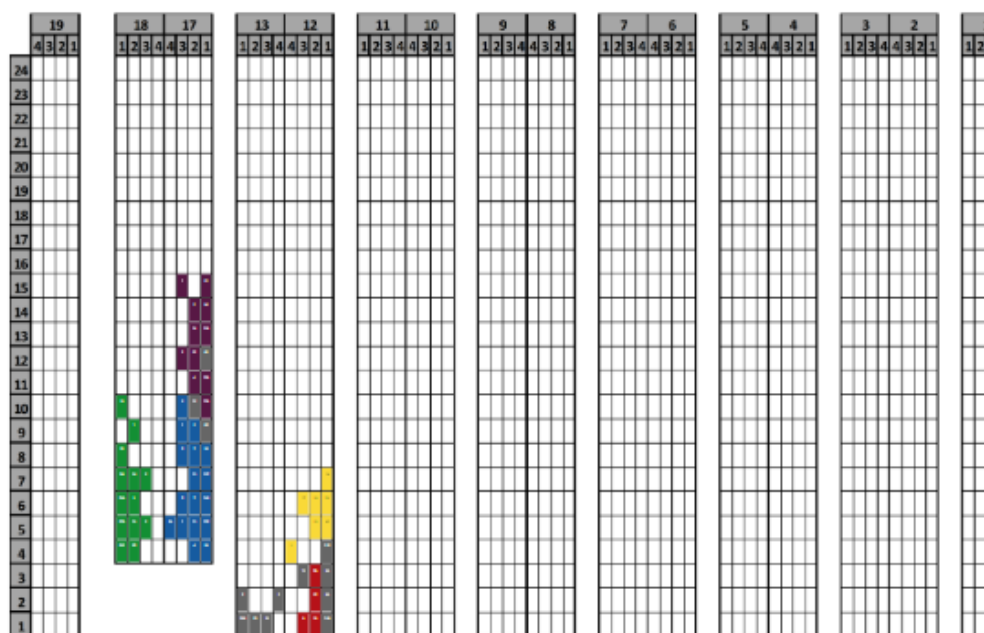


Joonis 22. B plokki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid ja Cook'i kaugus.



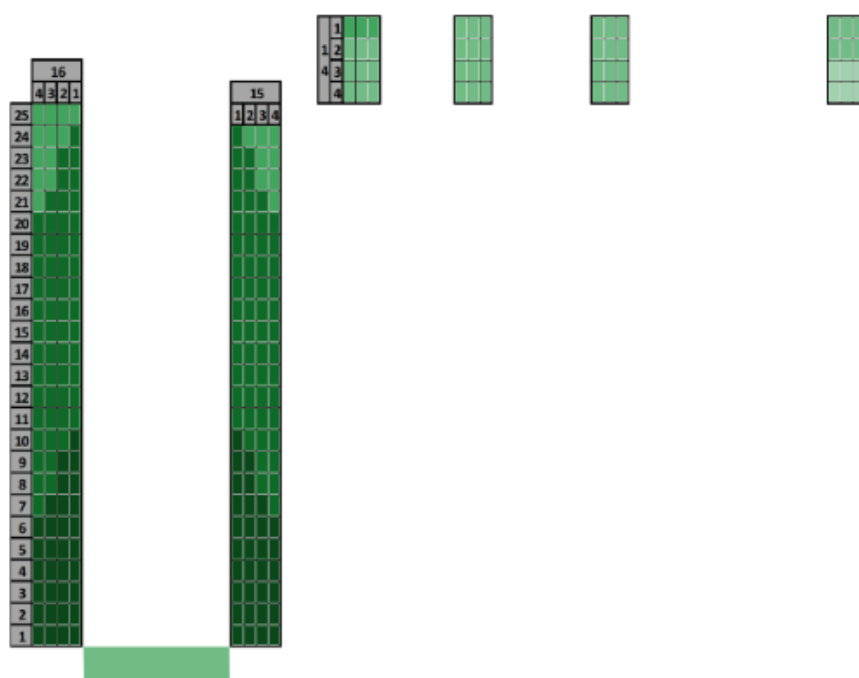
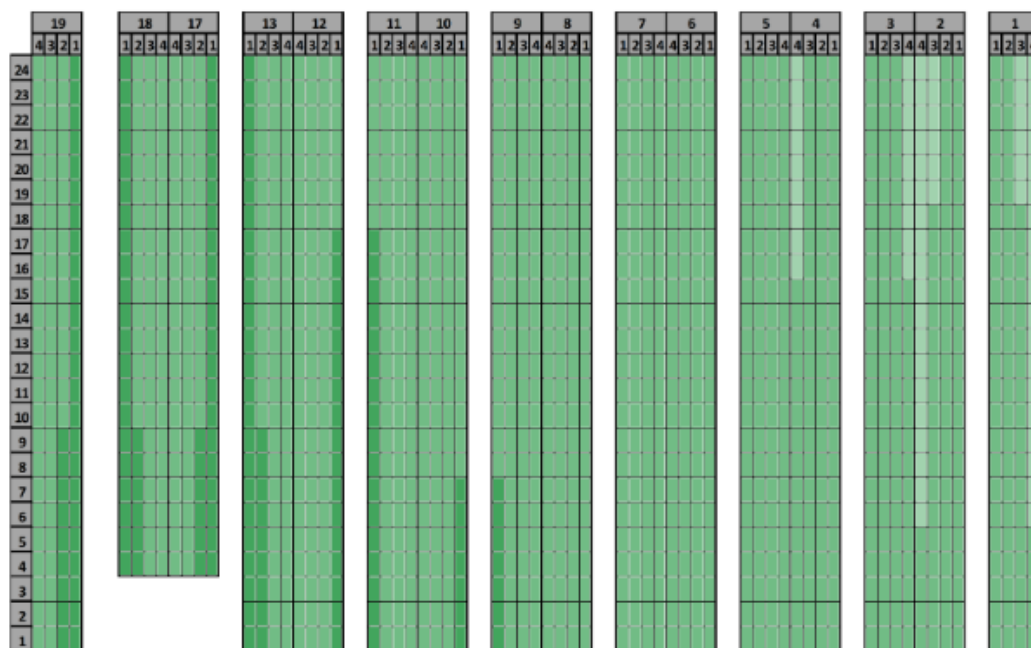
Joonis 23. C plokki lognormaalse jaotusega mudeli jäägid ja Cook'i kaugus.

NOPPIMISE ASUKOHT



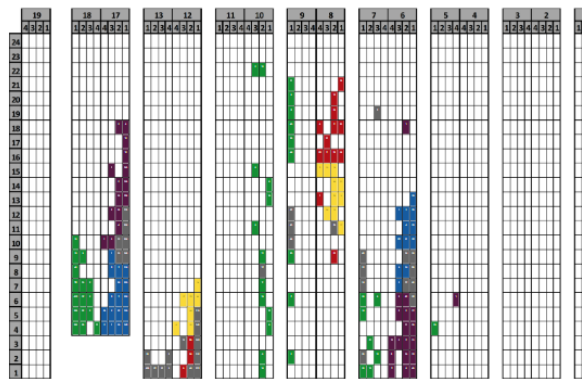
ACCESS

Joonis 24. Prioriteetsete kaupade noppimise asukohad viimase kolme kuu jooksul.

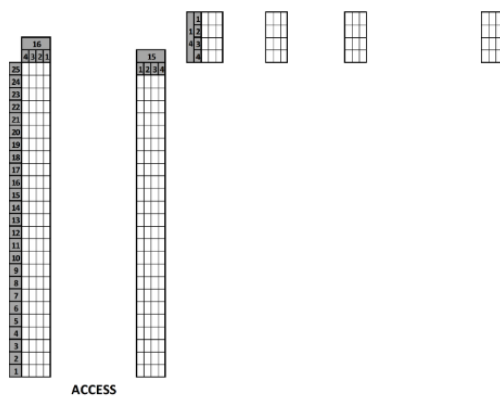
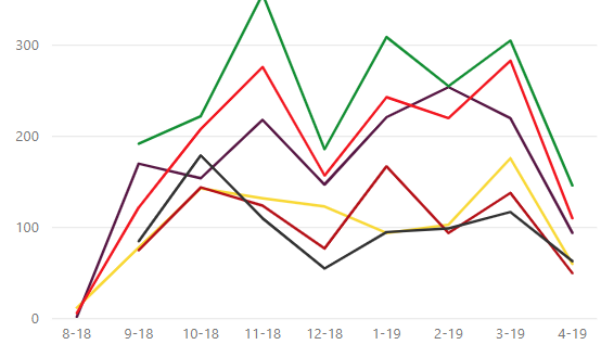


Joonis 25. Laoasukohtadest väljastusalani jõudmiseks kuluvat aega iseloomustav laoplaan.

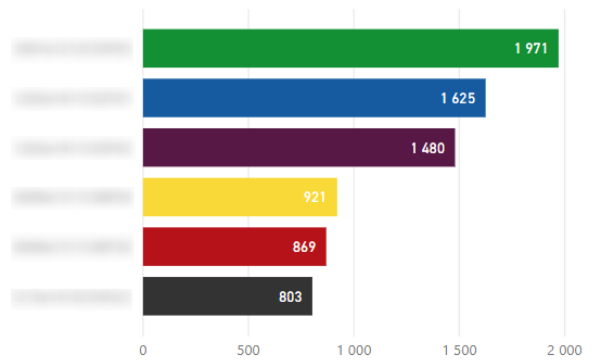
NOPPIMISE ASUKOHT



NOPPIMISTE ARV AJATELJEL



NOPPIMISTE ARV KAUBA LÕIKES



Joonis 26. Kuvatõmmis oluliste kaupade analüütikarakendusest.

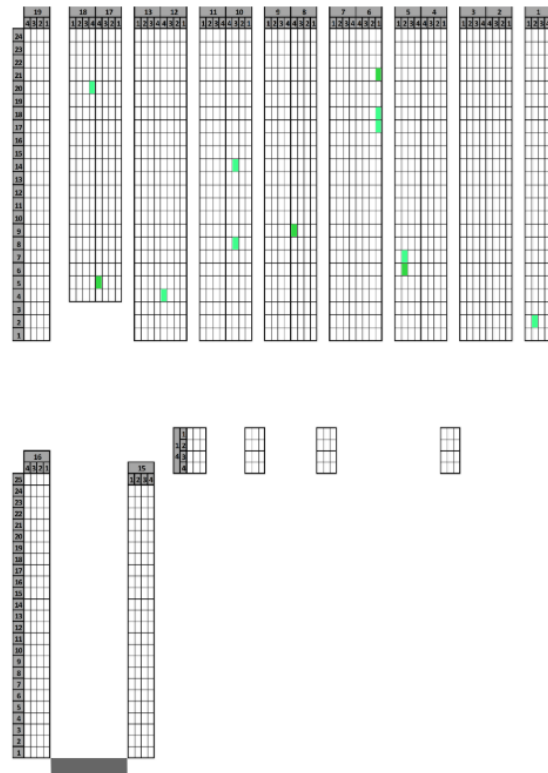
Where have we picked? ABC classification

Period YTD

Item search Item priority Location zone

Search A B C A B C

ABC Class	Count of Pickings	Picking Time
A	95	17.01.2019 7:54:30
Item n	46	18.02.2019 11:37:37
05-06-02	15	20.03.2019 7:27:00
06-21-01	13	3.04.2019 8:05:55
06-18-01	9	1.04.2019 13:02:04
06-17-01	8	29.03.2019 9:04:26
05-07-02	1	18.02.2019 11:37:37
Item n+1	24	18.03.2019 10:41:21
17-02-04	24	18.03.2019 10:41:21
Item n+2	17	17.01.2019 7:54:30
08-09-04	16	17.01.2019 7:54:30
10-14-03	1	13.02.2019 14:57:14
Item n+3	3	29.01.2019 8:24:09
12-04-04	3	29.01.2019 8:24:09
Item n+4	3	1.02.2019 10:44:01
10-08-03	3	1.02.2019 10:44:01
Item n+5	1	14.03.2019 14:10:29
18-17-04	1	14.03.2019 14:10:29
Item n+6	1	18.01.2019 8:57:41
01-02-02	1	18.01.2019 8:57:41
Total	95	17.01.2019 7:54:30



Joonis 27. Analüütikarakenduse kuvatõmmis.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kerli Mägi,

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Laoliikumiste analüüs ja optimeerimine tootmisettevõttes,

mille juhendaja on Meelis Käärik,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kerli Mägi
15.05.2019